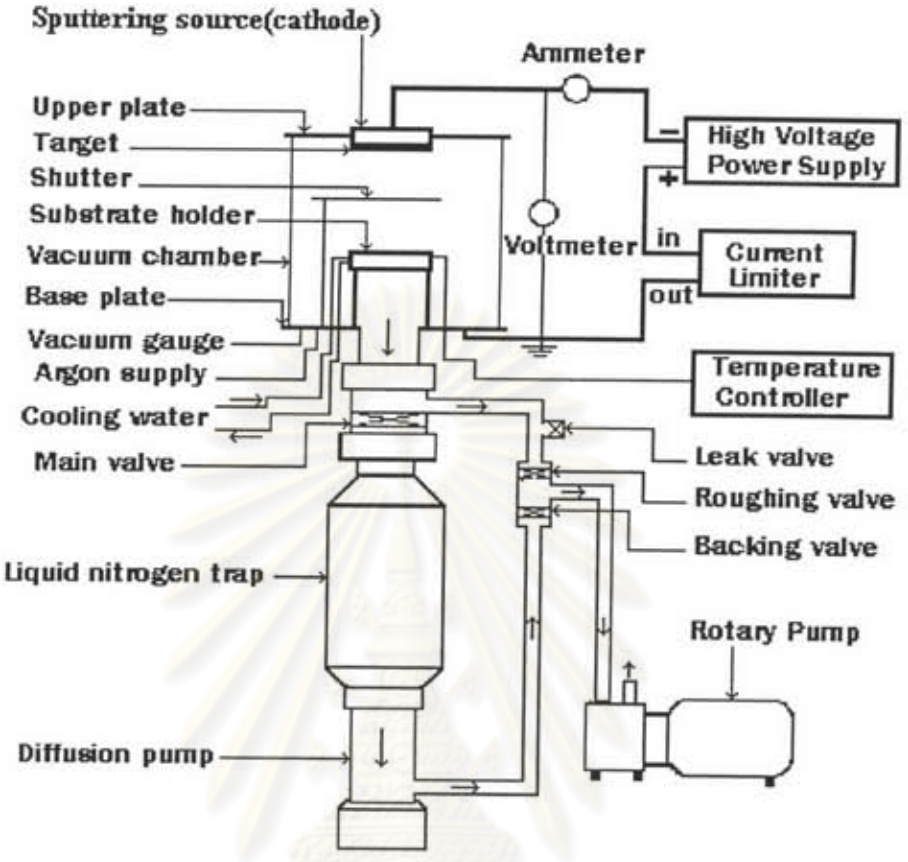
บทที่ 4

การสร้างเครื่องมือ

ในการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางโมลิบดินัมโดยระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงของสุชาติ [49] พบว่ามีปัญหาหลายประการ ได้แก่ ปัญหาการอาร์คในขณะที่เกิดการดิสชาร์จซึ่งสร้างความเสียหายกับระบบจ่ายไฟฟ้าโวลท์สูง ปัญหาฟิล์มบางที่ได้ถูกปนเปื้อนน้ำมันจากปั๊มแพร่ไอน้ำมัน ปัญหาฟิล์มบางมีรอยแตกร้าวเนื่องจากความร้อน เป็นต้น แนวทางการแก้ปัญหาเหล่านี้ประกอบด้วยการดัดแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบของสุชาติให้มีระบบป้องกันตัวเองจากกระแสไฟฟ้าสูงเนื่องจากการอาร์ค การใช้ระบบปั๊มสุญญากาศที่มีกับดักไนโตรเจนเหลวสำหรับจับไอน้ำมัน การออกแบบให้แท่นวางวัสดุรองรับมีการระบายความร้อนได้ดี และการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์จากแบบดีซีไดโอดเป็นแบบดีซีแมกนิตรอน

จากการที่ได้ศึกษาถึงหลักการระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงในบทที่ผ่านมา จึงได้ออกแบบและจัดสร้างระบบสำหรับเคลือบฟิล์มบางแบบนี้ขึ้น วัตถุประสงค์ขั้นต้นก็เพื่อแก้ปัญหาที่พบโดยสุชาติดังกล่าว จากนั้นก็จะใช้เป็นระบบสำหรับศึกษาสมบัติของดีซีโกลวดิสชาร์จที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ตลอดจนการเคลือบฟิล์มบางของโลหะโมลิบดินัม และฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมต่อไป

ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ มีแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์เป็นแบบแมกนิตรอนระนาบวงกลม ส่วนประกอบต่างๆของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ภาชนะสุญญากาศ(Vacuum chamber) ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวล์ทสูง(High voltage power supply system)และระบบปั๊มสุญญากาศ (Hihg vacuum pump system)



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง

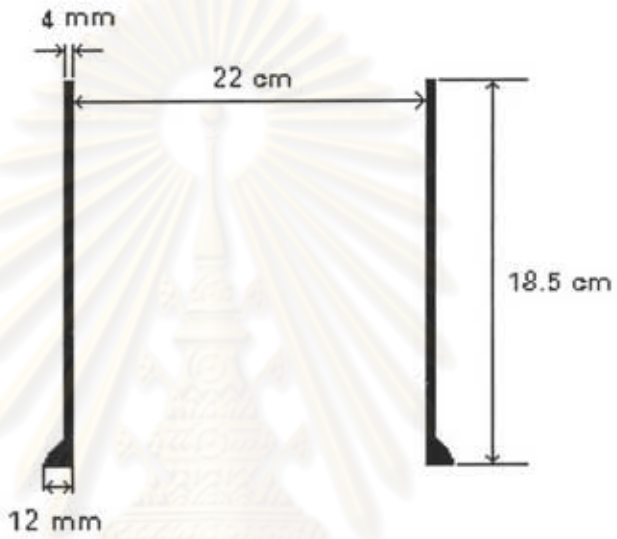
ภาชนะสุญญากาศ

ภาชนะสุญญากาศเป็นบริเวณที่กระบวนการทางฟิสิกส์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงเกิดขึ้น ประกอบด้วยผนังด้านข้าง(side wall) ฝาครอบด้านบน (upper plate) และฐานรอง(base plate) ภาชนะสุญญากาศเป็นที่ติดตั้งส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์(sputtering source) แท่นวางวัสดุรองรับ(substrate holder) และหน้ากาก(shutter)สำหรับคั่นระหว่างเป้าของการสปัตเตอร์กับแท่นวางวัสดุรองรับ

ต่อไปนี้จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบ และโครงสร้างของส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ รวมทั้งส่วนประกอบอื่นๆที่ติดตั้งภายในภาชนะสุญญากาศ

1. ผนังด้านข้าง

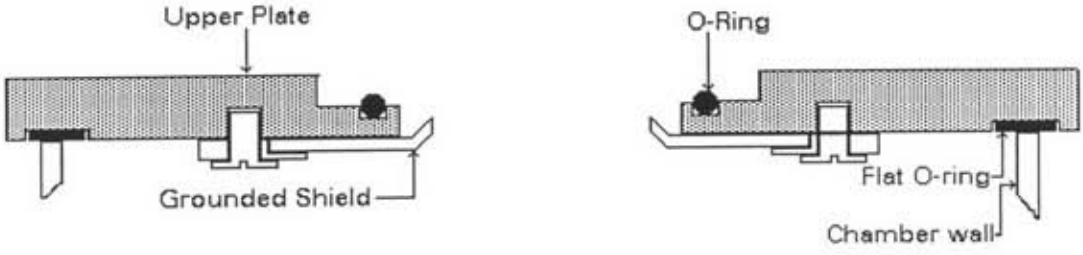
ผนังด้านข้างของภาชนะสุญญากาศเป็นท่อแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 22.0 เซนติเมตร สูง 18.5 เซนติเมตร ขอบบนและขอบฐานหนา 4 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.2 ผิวของขอบท่อแก้วขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายเรียงตามขนาดจากหยาบมากจนกระทั่งละเอียดที่สุด



รูปที่ 4.2 ขนาดของท่อแก้วที่ใช้เป็นผนังด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ

2. ฝาครอบด้านบน(upper plate)

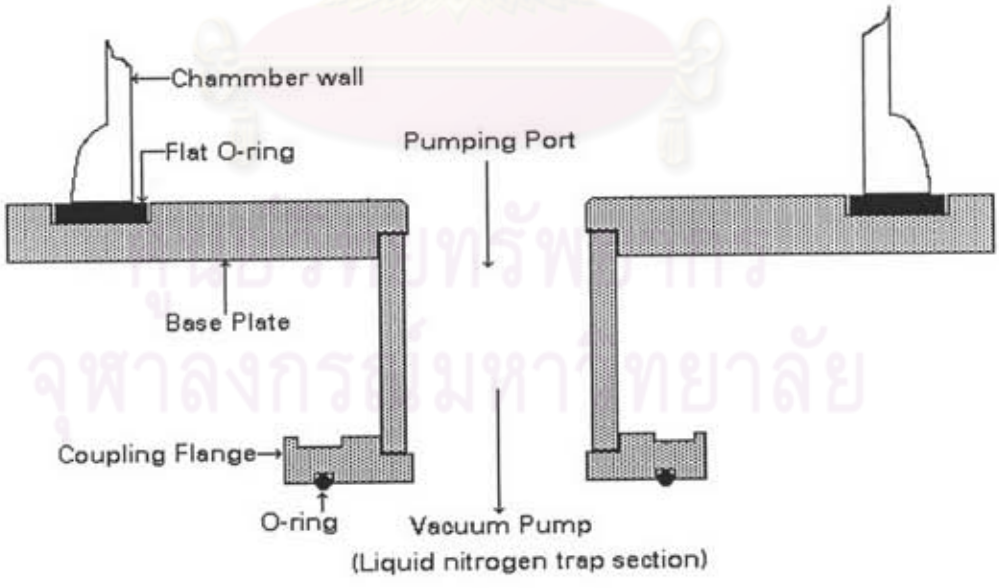
ฝาครอบด้านบนทำด้วยแผ่นทองเหลืองวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ภาพภาคตัดขวางของฝาครอบด้านบน แสดงดังรูปที่ 4.3 พื้นที่ของฝาครอบด้านบนส่วนที่รองรับด้วยขอบบนของท่อแก้วจะเซาะร่องวงแหวนกว้าง 2.5 เซนติเมตร สำหรับวางวงแหวนยางแบบแบน (flat O-ring) คั่นระหว่างผิวทองเหลืองกับขอบแก้วเพื่อกันการรั่วของสุญญากาศ ตรงกลางของฝาครอบด้านบนเจาะเป็นช่องวงกลมสำหรับติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ โดยที่ริมขอบของช่องเปิดนี้จะเซาะร่องสำหรับวงแหวนยาง (o-ring) ที่จะรองรับการติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ และกันรั่วระหว่างฝาครอบด้านบนกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ นอกจากนี้ใต้ฝาครอบด้านบนยังเป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งวงแหวนทำจากแผ่นทองแดง ซึ่งมีช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ที่จะทำหน้าที่เป็น ground shield ด้วย



รูปที่ 4.3 ภาพภาคตัดขวางของฝาครอบด้านบน

3. ฐานรอง

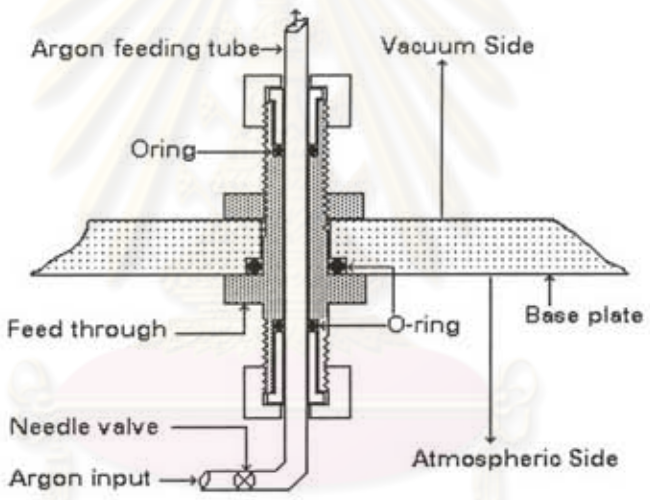
ฐานรองทำหน้าที่เป็นฝาด้านล่างของท่อแก้วทรงกระบอกทำด้วยแผ่นทองเหลือง ขนาดเท่ากับฝาครอบด้านบน พื้นที่ของฐานรองบริเวณที่รองรับขอบของท่อแก้ว จะเซาะร่องสำหรับวางแผ่นยางวงแหวนคั่นระหว่างผิวทองเหลืองกับแก้วเพื่อกันการรั่ว เช่นเดียวกับฝาครอบด้านบน ตรงกลางฐานรองเจาะช่องวงกลมสำหรับเป็นช่องปั๊มอากาศ(pumping port)และติดข้อต่อ (coupling flange) สำหรับเชื่อมต่อกับระบบปั๊มสุญญากาศ รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพภาคตัดขวางของฐานรอง

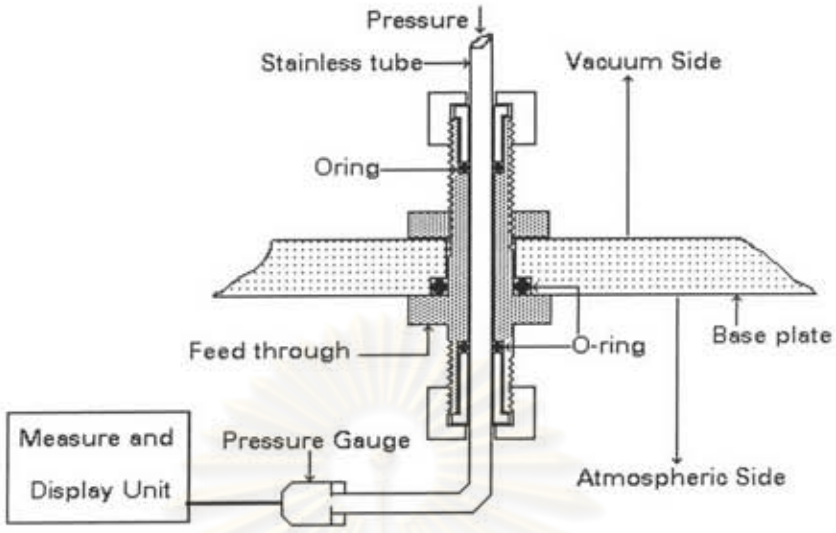
นอกจากนี้ฐานรองยังเป็นที่ติดตั้งส่วนประกอบอื่นๆ ดังนี้

- ท่อนำกาซอาร์กอน(argon feeding tube) เป็นท่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 มิลลิเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร ใช้สำหรับป้อนกาซอาร์กอนจากถังเก็บเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยมีวาล์วแบบเข็ม(needle valve) สำหรับควบคุมอัตราการไหลของกาซ ท่อนำกาซอาร์กอนจากด้านนอกจะสอดผ่านเข้าไปในภาชนะสุญญากาศที่ช่องทะลุผ่าน (feedthrough) ซึ่งติดตั้งอยู่บนฐานรอง แสดงดังรูปที่ 4.5 ท่อนำกาซนี้จะต่อยาวเข้าไปในภาชนะสุญญากาศสูง 15 เซนติเมตร โดยปลายท่อซึ่งเป็นจุดที่กาซอาร์กอนพุ่งออกสู่ภาชนะสุญญากาศจะอยู่ต่ำกว่าระดับผิวเป้าประมาณ 3 เซนติเมตร และห่างออกไปในแนวรัศมีเป้าประมาณ 10 เซนติเมตร ปลายท่อส่วนนี้จะใช้เป็นแกนสำหรับการหมุนของหน้ากากด้วย(ดูรูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.5 การติดตั้งท่อนำกาซอาร์กอน

- ช่องวัดความดัน เป็นที่ติดหัววัดความดันสำหรับวัดความดันกาซในภาชนะสุญญากาศ ระบบวัดความดันกาซเป็นเครื่องยี่ห้อ Leybold รุ่น Combitron CM 330 ใช้หัววัดความดันแบบ Thermocouple Gauge อ่านความดันได้ระหว่าง 10^{3} มิลลิบาร์ จนถึงความดันบรรยากาศ ส่วนประกอบและการติดตั้งช่องวัดความดันจะเหมือนกับท่อนำกาซอาร์กอนเพียงแต่ปลายท่อด้านที่โผล่เข้าไปในภาชนะสุญญากาศจะสั้นกว่า(ยาวประมาณ 1 เซนติเมตร) ส่วนปลายที่อยู่นอกภาชนะสุญญากาศ ใช้เป็นที่ติดหัววัดความดันแทนที่จะต่อไปยังถังเก็บกาซอาร์กอน แสดงดังรูปที่ 4.6

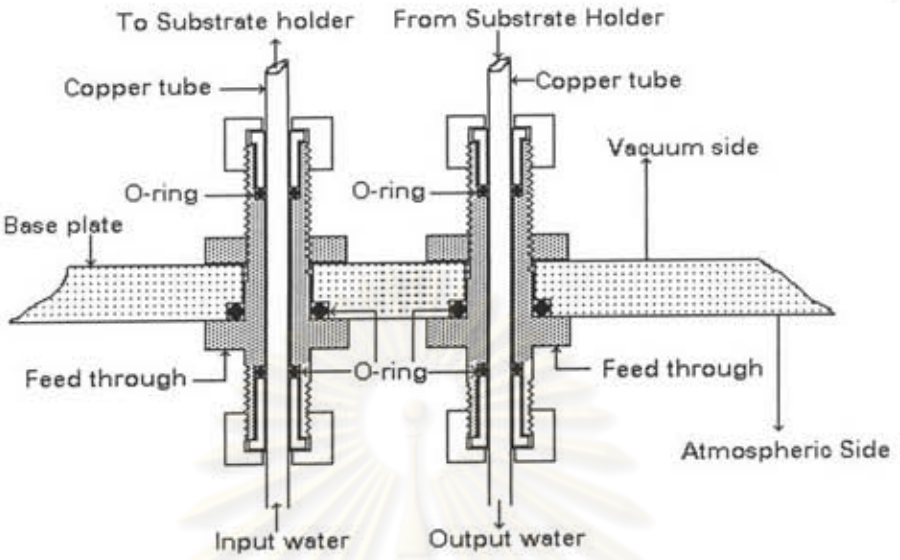


รูปที่ 4.6 ช่องติดหัววัดความดันกาซและการติดตั้งบนฐานรอง

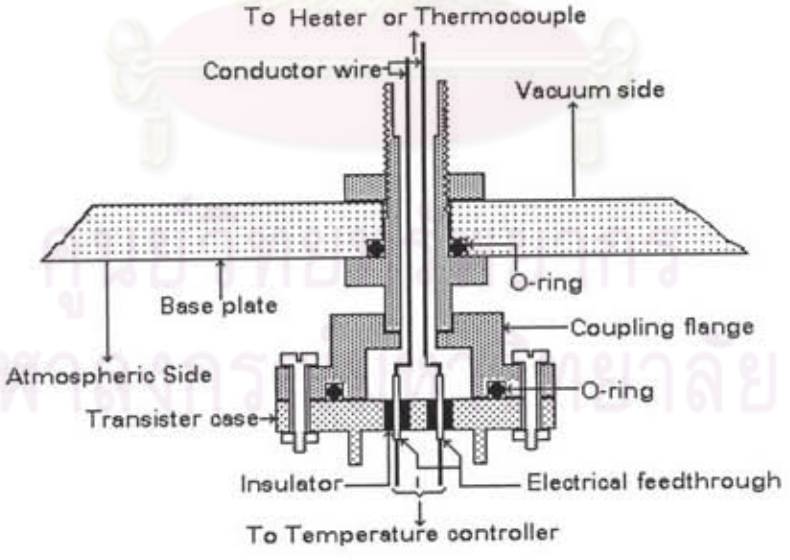
- ท่อน้ำระบายความร้อนของแท่นวางวัสดุรองรับ เป็นท่อทองแดงขนาดเท่ากันกับท่อนำกาซอาร์กอน สอดผ่านเข้าไปในภาชนะสุญญากาศตรงช่องทะลุผ่านลักษณะเหมือนกันกับท่อนำกาซอาร์กอน ช่องทะลุผ่านสำหรับท่อน้ำมีอยู่สองช่อง สำหรับท่อน้ำขาเข้าและขาออก ท่อน้ำตั้งแต่ด้านขาเข้าจนถึงด้านขาออกทำจากท่อทองแดงเส้นเดียวกัน เพื่อให้น้ำกับสุญญากาศแยกจากกันโดยสิ้นเชิง ท่อน้ำส่วนที่ผ่านเข้าไปในแท่นวางวัสดุรองรับจะดัดเป็นขดวงกลมเพื่อให้น้ำจากด้านขาเข้ามีการไหลเวียนภายในแท่นวางวัสดุรองรับอย่างทั่วถึง (แต่ไม่สัมผัสกับแท่นวางวัสดุรองรับโดยตรง) ก่อนที่จะไหลออกทางท่อน้ำขาออก การติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.7

- ขั้วไฟฟ้าทะลุผ่าน(electrical feedthrough) มีทั้งหมด 2 ชุด แต่ละชุดมีขั้วต่อสายไฟฟ้า 2 ขั้ว ชุดหนึ่งสำหรับต่อเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิของแท่นวางวัสดุรองรับ อีกชุดหนึ่งสำหรับต่อสายไฟฟ้าจากขดลวดความร้อนของแท่นวางวัสดุรองรับ ขั้วไฟฟ้าทะลุผ่านนี้ได้ดัดแปลงมาจากทรานซิสเตอร์ตัวถังโลหะรูปทรงจานบิน โดยนำมาเปิดฝาครอบด้านหลังออกและใช้ขาเบสกับขาอิมิตเตอร์ทำเป็นขั้วสำหรับต่อสายไฟฟ้า ผิวด้านหน้าของทรานซิสเตอร์ซึ่งเรียบจะประกบกับชุดข้อต่อ(Coupling Flange) ที่ทำด้วยทองเหลือง โดยมีวงแหวนยางคั่นและเป็นตัวกันรั่ว ส่วนประกอบทั้งหมดจะติดตั้งบนฐานรอง ในลักษณะเดียวกันกับช่องทะลุผ่านสำหรับท่อนำกาซอาร์กอนแสดงดังรูปที่ 4.8

79



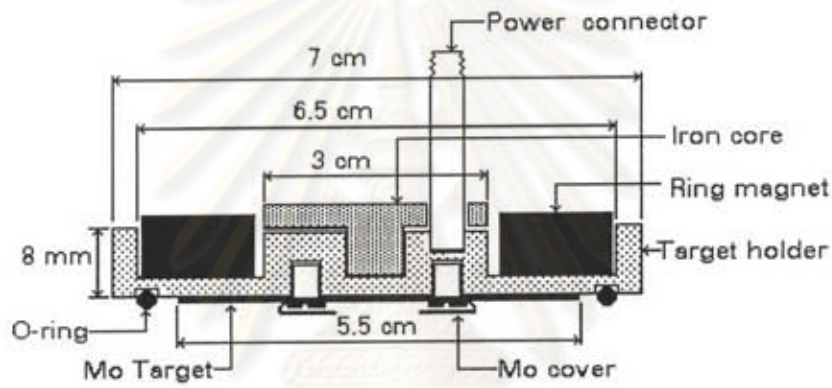
รูปที่ 4.7 การติดตั้งท่อน้ำระบายความร้อน



รูปที่ 4.8 ขั้วต่อไฟฟ้าและการติดตั้งบนฐานรอง

4. แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์

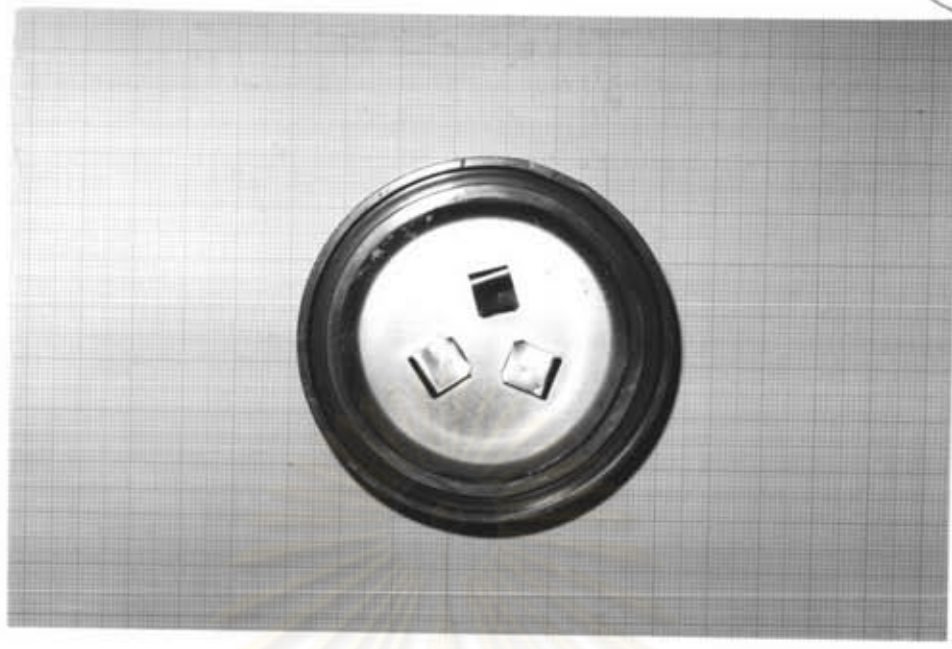
แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ถือว่าเป็นหัวใจหลักของระบบ ในการออกแบบขั้นต้นได้คำนึงถึงหลักสำคัญคือ ให้เป็นแบบที่ติดตั้งบนฝาครอบด้านบนเพื่อที่จะสามารถระบายความร้อนด้วยอากาศ สามารถติดตั้งหรือเปลี่ยนเป้าและแม่เหล็กได้สะดวก แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัย ถูกสร้างขึ้นตามแนวความคิดนี้ และใช้ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กต่อสมบัติของดีซีโกลวดิสชาร์จ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ แท่นยึดเป้า(target holder) แม่เหล็กวงแหวน(ring magnet) พร้อมแกนเหล็ก(iron core) และเป้า (target) แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1

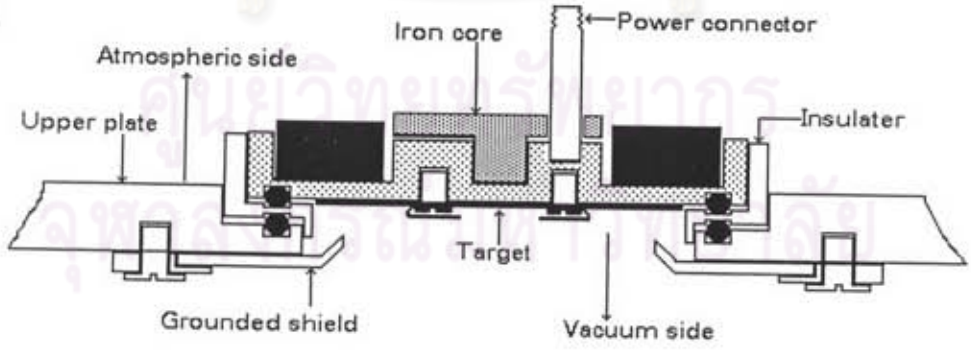
แท่นยึดเป้าเป็นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 8 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้เป็นโลหะทองแดงเพื่อให้มีการระบายความร้อนจากเป้าได้ดี ด้านบนมีร่องสำหรับวางแม่เหล็กแบบวงแหวนพร้อมกับแกนเหล็กอ่อน สามารถรองรับแม่เหล็กที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกใหญ่ที่สุด 6.5 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร แกนกลางของแท่นยึดเป้าจะมีปลายขั้วไฟฟ้าฝังอยู่ การต่อไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโวลท์สูงจะต่อที่ขั้วไฟฟ้านี้

เป้าทำด้วยแผ่นโมลิบดินัมหนา 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ยึดติดกับแท่นยึดเป้าด้านตรงข้ามกับแม่เหล็กด้วยนอตทองเหลืองขนาด 3 มิลลิเมตร 3 ตัว ซึ่งวางห่างกัน 120 องศา และใช้แผ่นโมลิบดินัมซึ่งมีความหนาเท่ากับเป้าตัดเป็นชิ้นเล็กๆปิดทับหัวนอตไว้เพื่อไม่ให้ถูกสปัตเตอร์ ภาพถ่ายของเป้าที่ติดเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 4.10



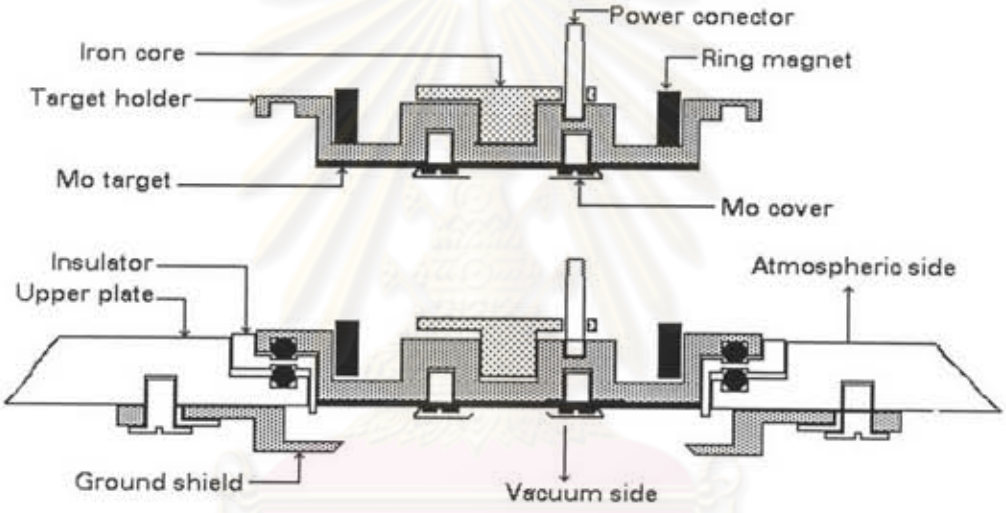
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายแสดงเป้าที่ติดเรียบร้อยแล้ว

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ที่ประกอบเป็นชุดเรียบร้อยแล้ว จะติดตั้งบนฝาครอบด้านบนตรงตำแหน่งช่องเปิดวงกลม โดยมีวงแหวนทำด้วยเทฟลอนเป็นตัวรองรับและทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.11 การระบายความร้อนจะใช้พัดลมเป่าด้านบนของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์โดยตรง



รูปที่ 4.11 การติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1

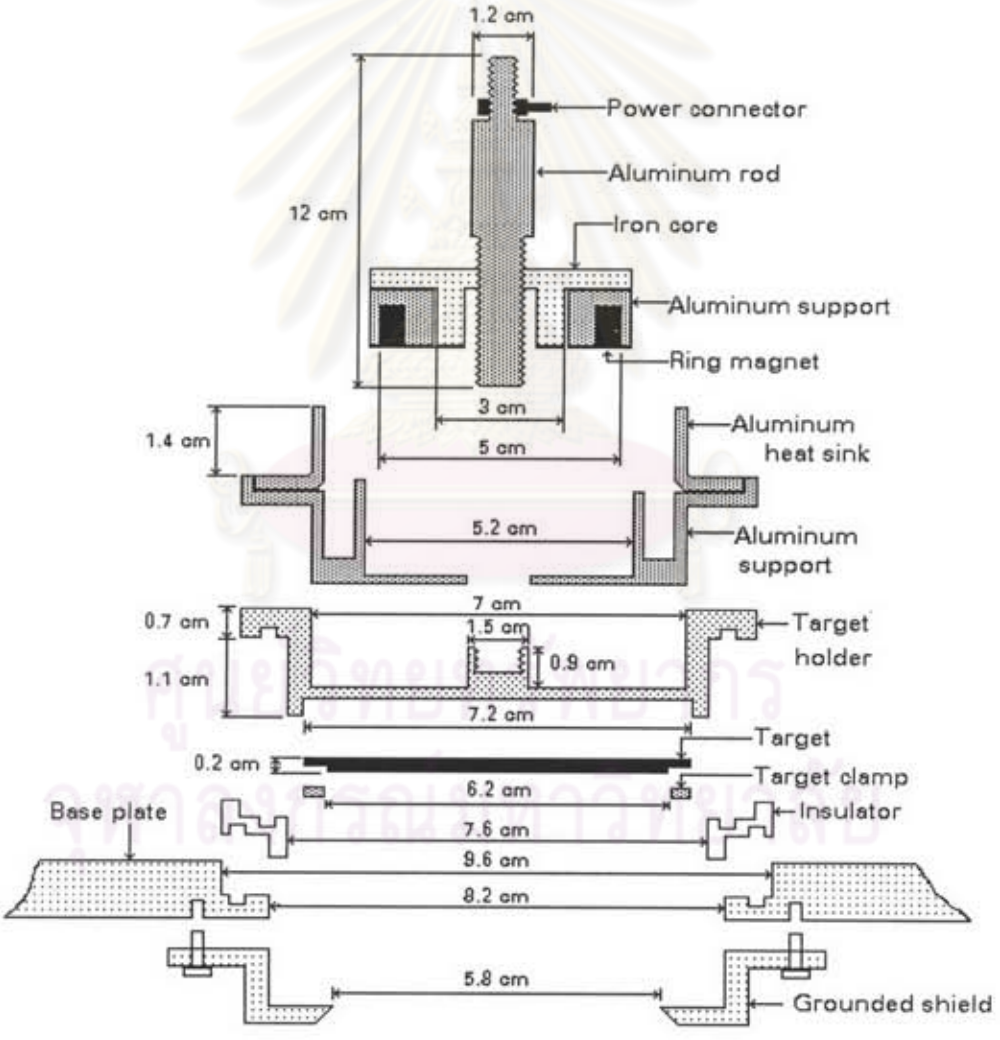
จากการศึกษาลักษณะสอของการดิสชาร์จ โดยใช้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 (รายละเอียดจะเสนอในบทต่อไป) ได้นำไปสู่การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 และแบบที่ 3 ตามลำดับ แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 [50,51] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 มีการปรับเปลี่ยนจากแบบที่ 1 เล็กน้อย เพื่อให้ใช้ได้เฉพาะกับแม่เหล็กโลหะผสม Nd-Fe-B ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร และสูง 9 มิลลิเมตร โดยที่ยังใช้เป้าโมลิบดินัมขนาดเท่าเดิม นอกจากนี้ได้เปลี่ยน Grounded shield จากแบบวงแหวนที่ทำด้วยแผ่นทองแดงเป็นแบบวงแหวนทำด้วยทองเหลือง เนื่องจากมีความแข็งแรงและสะดวกต่อการทำความสะอาดมากกว่า แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 ถูกใช้เป็นหลักสำหรับการเคลือบฟิล์มบางของโลหะโมลิบดินัม



รูปที่ 4.12 (บน) แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2
(ล่าง) การติดตั้งบนฝาตรอบด้านบน

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 ถูกสร้างขึ้นด้วยวัตถุประสงค์ที่ให้สามารถติดแม่เหล็กได้หลายขนาด สามารถปรับระดับของแม่เหล็กได้ตลอดเวลาขณะสปัตเตอร์เคลือบฟิล์ม ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเป้าเป็น 8 เซนติเมตร สามารถเปลี่ยนเป้าที่มีความหนาต่างๆ กันได้สะดวก และให้มีการระบายความร้อนที่ดียิ่งขึ้นเพื่อที่จะใช้ในการสปัตเตอร์อินเดียมซึ่งเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้ แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 มีลักษณะดังรูปที่ 4.13 ส่วนที่แตกต่างจากสองแบบแรก คือ วิธีการติดเป้ากับแท่นยึดเป้าได้เปลี่ยนจากการยึดด้วยนอตทองเหลืองเป็นการใช้แหวนทองเหลืองซึ่งอัดกับขอบของแท่นยึดเป้าที่ยกสูงขึ้นเป็นตัวหนีบให้เป้า

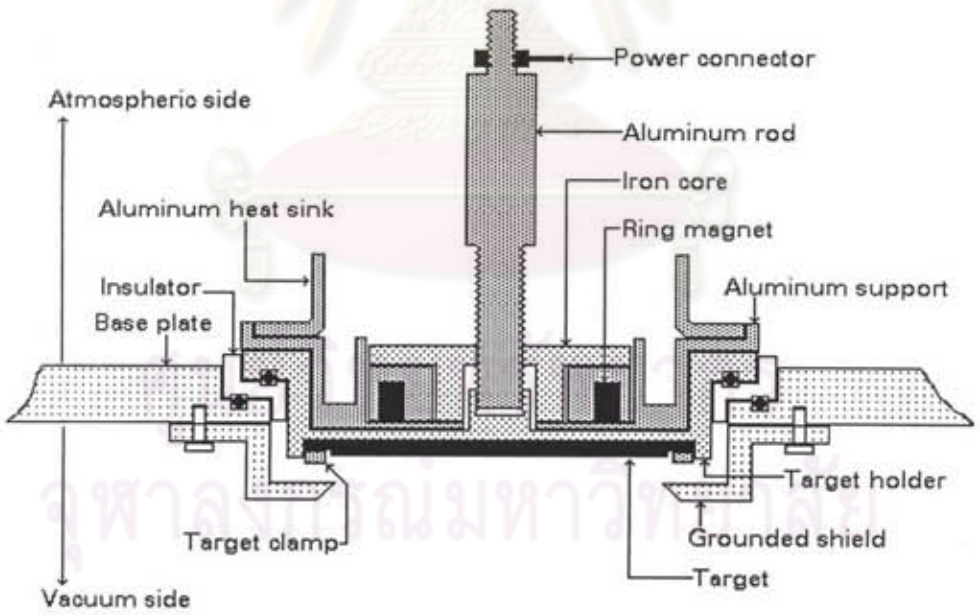
แนบกับแท่นยึดเป้า วิธีการนี้ทำให้การถอดและติดเป้าสะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของการติดตั้งแม่เหล็ก (แม่เหล็กอันเดียวกันกับที่ใช้ในแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2) เพื่อที่จะให้สามารถปรับระยะห่างจากเป้าได้ง่ายและมีความละเอียดพอสมควร จึงดัดแปลงแกนเหล็กอ่อนเป็นแบบที่มีรูตรงแนวแกนกลาง และทำเป็นเกลียวสำหรับสวมเข้ากับเกลียวบนแท่งอลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วต่อไฟฟ้า แท่งอลูมิเนียมนี้ติดตั้งกับแท่นยึดเป้าตรงแนวแกนกลางโดยสวมเข้ากับเกลียวที่ทำไว้บนแท่นยึดเป้าโดยตรง เมื่อสวมแกนอลูมิเนียมติดแน่นกับแท่นยึดเป้าแล้ว การปรับระดับแม่เหล็กทำได้โดยการหมุนชุดแม่เหล็กให้เลื่อนขึ้นลงตามแนวของแท่งอลูมิเนียม ด้วยวิธีการเช่นนี้ก็จะสามารถปรับแม่เหล็กให้ชิดกับเป้ามากที่สุด หรือค่อยๆปรับระยะที่แม่เหล็กห่างจากเป้าได้อย่างต่อเนื่อง



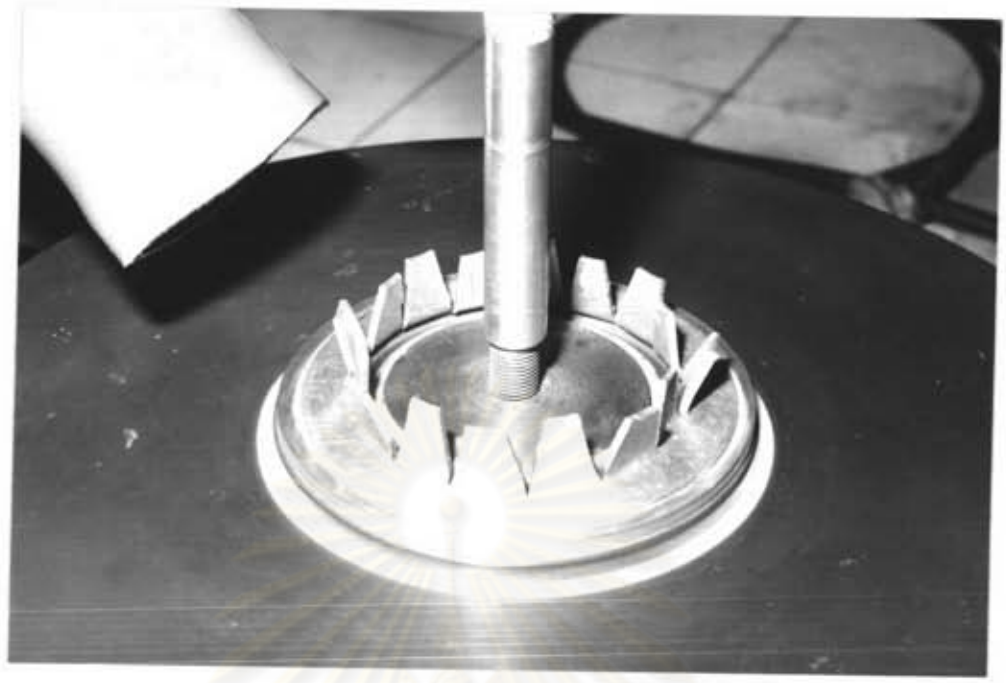
รูปที่ 4.13 แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3

ในส่วนของการเพิ่มอัตราระบายความร้อนออกจากเป้า ได้ติดครีบระบายความร้อนที่ผิวเปิดของแท่นยึดเป้าด้านที่ติดกับบรรยากาศ ครีบระบายความร้อนนี้ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมวงกลมหนา 2 มิลลิเมตร โดยตัดและดัดให้มีรูปทรงคล้ายมงกุฎหรือกระทง และมีกลีบเล็กๆ โดยรอบ ครีบระบายความร้อนจะประกบบนตัวรองรับทำด้วยอลูมิเนียม (aluminum support) ซึ่งวางซ้อนอยู่บนแท่นยึดเป้า และทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจากแท่นยึดเป้าไปยังครีบระบายความร้อน บริเวณผิวสัมผัสระหว่างตัวรองรับอลูมิเนียมกับแท่นยึดเป้าจะทาด้วยครีมซิลิโคนเพื่อช่วยในการส่งผ่านความร้อน ในระหว่างการทำงานจะใช้พัดลมเป่าเข้าโดยตรงที่ครีบระบายความร้อนและผิวของส่วนประกอบอื่นๆที่เปิดสัมผัสกับอากาศ

เนื่องจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น จึงต้องจัดสร้างฝาครอบด้านบน รวมทั้งฉนวนเทฟลอนใหม่ แต่ยังคงลักษณะของแบบเดิมในรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อประกอบและติดตั้งเสร็จแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 4.14 ส่วนรูปที่ 4.15 เป็นภาพถ่ายของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 ซึ่งติดตั้งอยู่บนฝาครอบด้านบนของภาชนะสุญญากาศในระบบที่ใช้งานจริง



รูปที่ 4.14 การติดตั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3

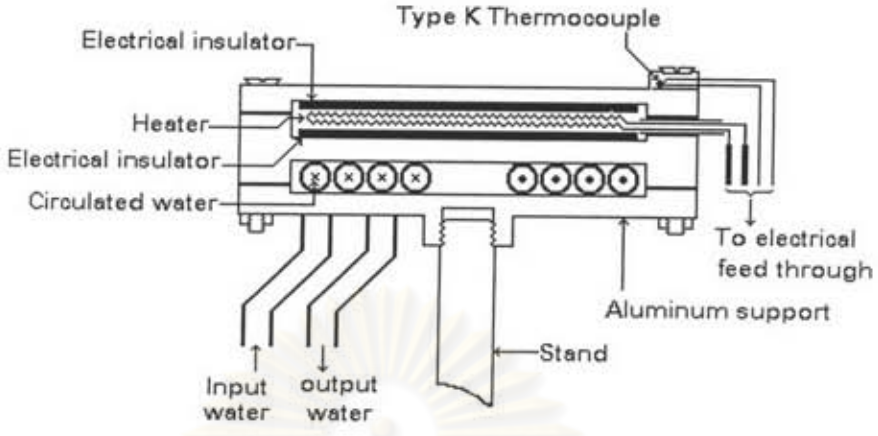


รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3
ซึ่งติดตั้งบนฝาครอบบนของภาชนะสุญญากาศ

แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 ที่สร้างขึ้นนี้ กล่าวได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ที่เปิดกว้างสำหรับใช้เคลือบฟิล์มบางของโลหะทั่วไปได้ โดยเพียงแค่เปลี่ยนเป้าของการสปัตเตอร์เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 จะถูกใช้เป็นหลักสำหรับศึกษาการเคลือบฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียม

5. แท่นวางวัสดุรองรับ

แท่นวางวัสดุรองรับมีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 4.16 เป็นตลับวงกลมทำด้วยอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หนา 1.5 เซนติเมตร ภายในบรรจุขดลวดความร้อนขนาด 100 วัตต์ และท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 6 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ท่อทองแดงนี้จะขดเป็นวงกลมสำหรับให้น้ำไหลวนระบายความร้อนออกจากแท่นวางวัสดุรองรับ ปลายท่อทั้งสองสอดผ่านช่องทะลุผ่านสำหรับท่อน้ำซึ่งติดอยู่บนฐานรอง โดยมีวงแหวนยางเป็นตัวกันการรั่วของสุญญากาศ (ดูรูปที่ 4.7)



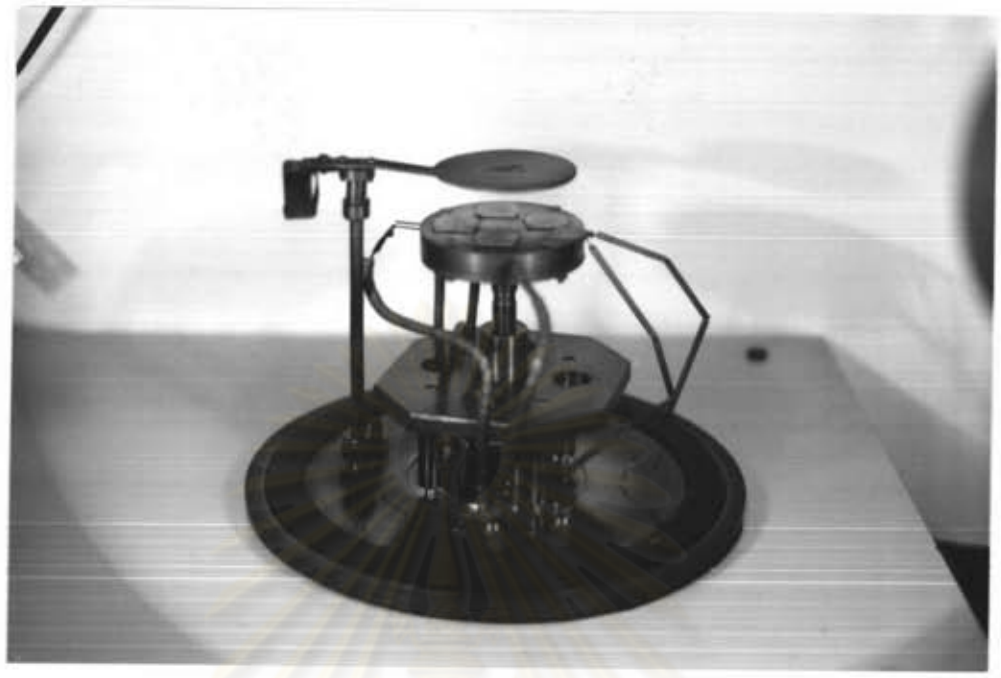
รูปที่ 4.16 ภาพภาคตัดขวางของแท่นวางวัสดุรองรับ

บนผิวของแท่นวางวัสดุรองรับจะติดหัววัดอุณหภูมิ เป็นเทอร์โมคับเปิลชนิด K (Type K thermocouple : Cromel-Alumel) โดยฝังหัวรอยต่อไว้ในแผ่นทองแดงหนา 2 มิลลิเมตร ทั้งหัววัดอุณหภูมิและขดลวดความร้อนจะต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งอยู่ภายนอกภาชนะสุญญากาศ โดยผ่านทางขั้วต่อไฟฟ้าที่ฐานรอง(ดูรูปที่ 4.8)

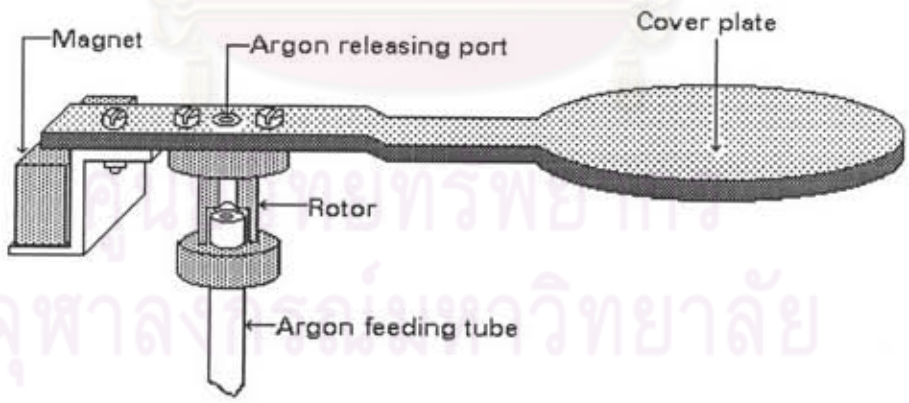
แท่นวางวัสดุรองรับวางอยู่บนขาตั้งซึ่งตั้งอยู่บนฐานรอง มีแนวแกนกลางตรงกันกับแกนกลางของคาโธด ระยะห่างจากคาโธดประมาณ 5 เซนติเมตร แท่นวางวัสดุรองรับที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 4.17

6. หน้ากาก

หน้ากากทำด้วยแผ่นอลูมิเนียม 2 มิลลิเมตร โดยตัดให้มีลักษณะดังรูปที่ 4.18 ตัวหมุนของหน้ากากสวมอยู่บนปลายท่อนำกาซอาร์กอน และสามารถหมุนรอบปลายท่อได้อย่างอิสระ การควบคุมการหมุนของหน้ากากจะกระทำจากภายนอกภาชนะสุญญากาศโดยใช้แม่เหล็กขนาดใหญ่ส่งแรงไปกระทำกับแม่เหล็กแท่งเล็กๆซึ่งติดไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของหน้ากาก ขณะที่อยู่ในตำแหน่งปิดเหนือแท่นวางวัสดุรองรับ หน้ากากจะอยู่ห่างเป้าประมาณ 3 เซนติเมตร การติดตั้งหน้ากากในภาชนะสุญญากาศดูได้ในภาพถ่ายในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของแท่นวางวัสดุรองรับและหน้ากากที่ติดตั้งอยู่ในภาชนะสุญญากาศ

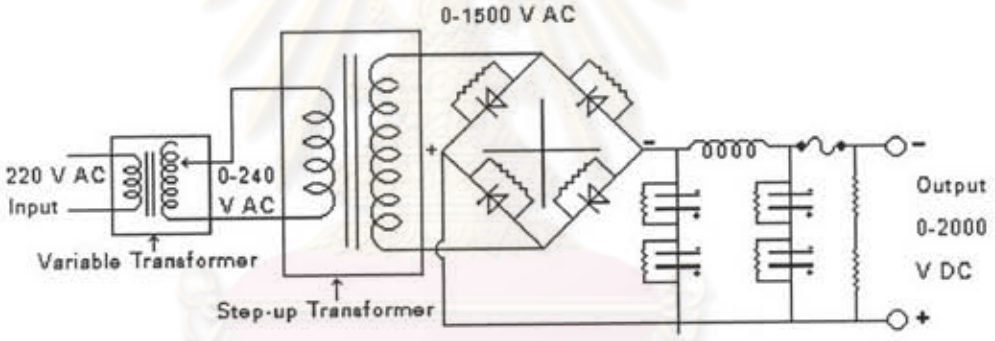


รูปที่ 4.18 ภาพวาดหน้ากาก

ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง

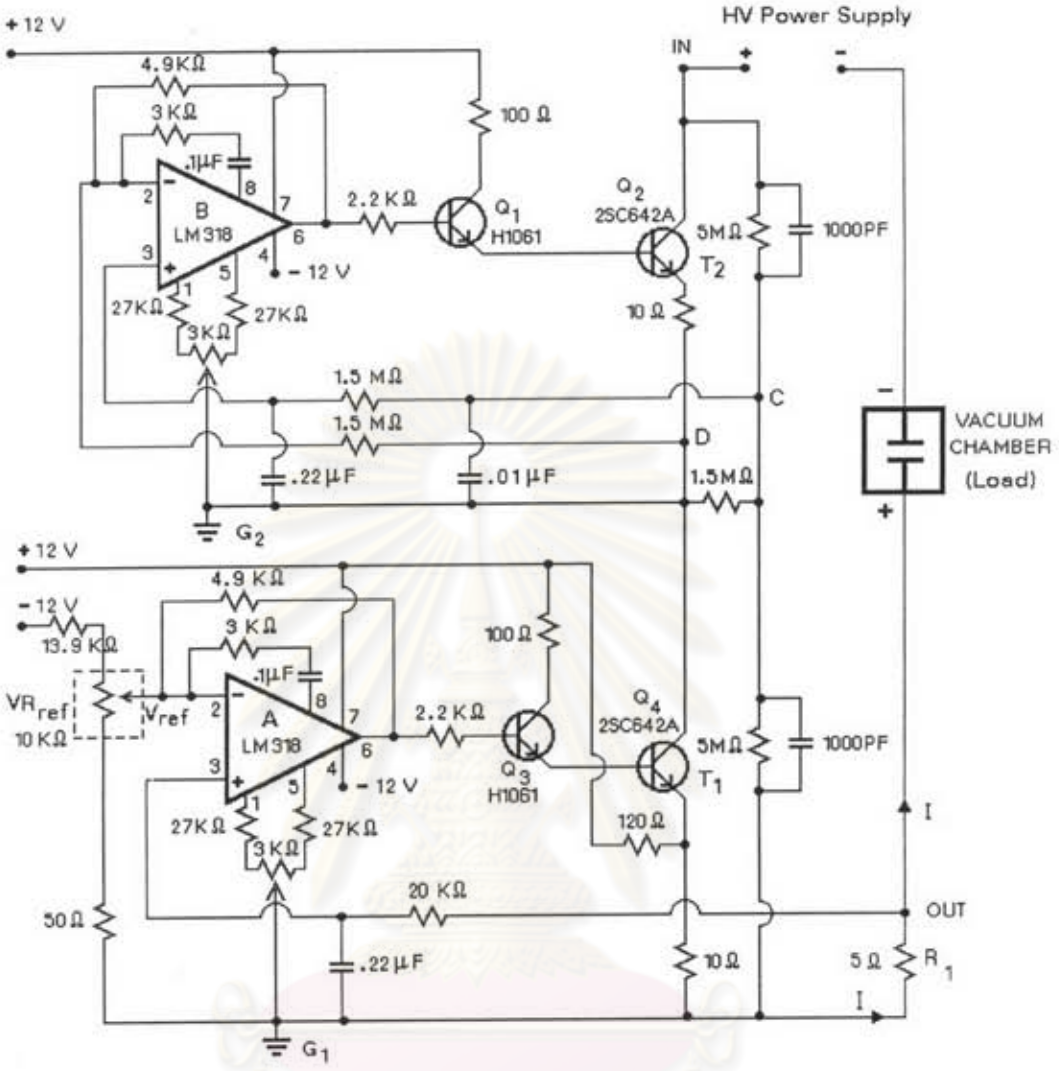
ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูงประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง (High voltage power supply) และวงจรจำกัดกระแส(current limit circuit)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูงเป็นเครื่องที่สร้างโดยสุชาติ [49] เป็นวงจรเรียงกระแสพร้อมด้วยวงจรกรองแรงดัน แสดงดังรูปที่ 4.19 เครื่องนี้สามารถจ่ายแรงดันได้ระหว่าง 0-2000 โวลท์ ทนกระแสได้สูงสุด 1 แอมแปร์ การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของวงจรทำได้โดยปรับที่หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ ซึ่งต่ออยู่ด้านหน้าหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้นี้จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออกระหว่าง 0-240 โวลท์ ซึ่งจะนำไปป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้น เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูง 0-1500 โวลท์ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน และได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกระหว่าง 0-2000 โวลท์ในที่สุด



รูปที่ 4.19 วงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง

วงจรจำกัดกระแสถูกสร้างเพิ่มเติมเข้าไปในระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูง เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์คในขณะที่มีการดิสชาร์จ เนื่องจากการอาร์คจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าสูงในวงจรซึ่งสามารถทำความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรกำเนิดไฟฟ้าโวลท์สูงได้ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น แผนผังของวงจรจำกัดกระแสแสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 วงจรเครื่องจำกัดกระแส

1. หลักการทำงานของวงจรจำกัดกระแส

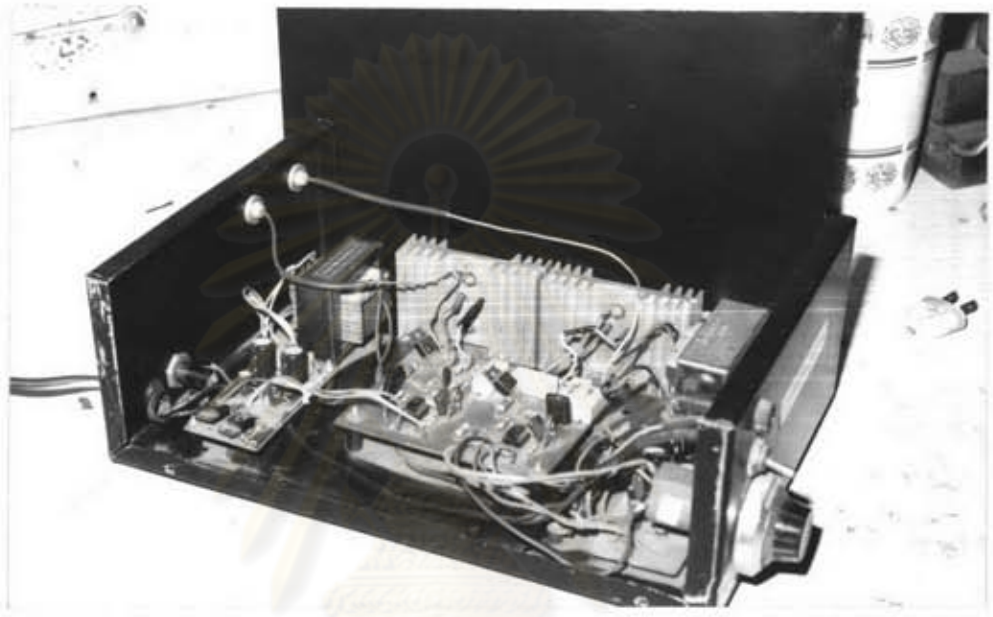
ภายในวงจรจำกัดกระแสตามรูปที่ 4.20 แยกการทำงานได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นวงจรเปรียบเทียบที่ควบคุมการทำงานโดยออปแอมป์ A ทำหน้าที่ควบคุมกระแสการดิสชาร์จโดยการวัดกระแสการดิสชาร์จ (I) ในรูปของความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง(V_{ref}) และปรับขนาดกระแสที่ผ่านตัวต้านทาน R_1 โดยการส่งความต่างศักย์ไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 ถ้ากระแสการดิสชาร์จสูง

จนทำให้ความต่างศักย์ที่ตกตร่อมตัวต้านทาน R_1 มากกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง (V_{ref}) ความต่างศักย์ที่ออปแอมป์ A ส่งไปขับการทำงานทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 จะลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 ลดลง มีผลให้กระแสการดิสชาร์จที่ผ่านตัวต้านทาน R_1 ลดลงจนกระทั่งความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 และความต่างศักย์อ้างอิงเท่ากัน ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลสุดท้ายที่ออปแอมป์ A พยายามรักษาไว้ การทำงานของวงจรในลักษณะนี้จะเรียกว่าเป็น "สภาพจำกัดกระแส" เนื่องจากความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 แปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ผ่าน ดังนั้นจึงสามารถควบคุมหรือปรับกระแสการดิสชาร์จได้โดยการปรับค่าความต่างศักย์อ้างอิง ซึ่งในวงจรนี้จะใช้วิธีปรับค่าความต้านทานของตัวตานทานปรับค่าได้ (VR_{ref}) ในกรณีที่กระแสของการดิสชาร์จที่ผ่านตัวต้านทานทาน R_1 มีค่าต่ำ และทำให้ความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 น้อยกว่าความต่างศักย์อ้างอิง ออปแอมป์ A จะเพิ่มความต่างศักย์ไปขับดันให้ทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 ทำงานและนำกระแสมากขึ้น เพื่อที่จะเพิ่มกระแสที่ผ่านตัวต้านทาน R_1 ซึ่งถ้ากระแสการดิสชาร์จไม่ถูกจำกัดโดยสภาพการดิสชาร์จเอง กระแสที่ผ่าน R_1 ก็จะสูงขึ้นตามลักษณะส่อของการดิสชาร์จที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามถ้ากระแสการดิสชาร์จในขณะนั้นไม่เพิ่มต่อไปได้อีก ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 ก็จะยังต่ำกว่าความต่างศักย์อ้างอิง ทำให้ทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 ถูกขับให้สามารถนำกระแสเต็มที่ตลอดเวลา (ทรานซิสเตอร์ทำงานเต็มที่) สภาพการทำงานเช่นนี้จะเรียกว่า "การหลุดจากสภาพจำกัดกระแส"

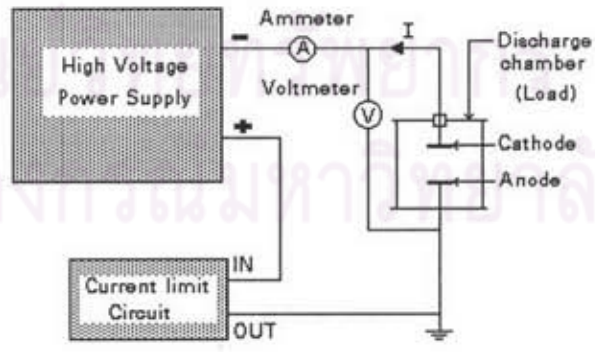
วงจรอีกส่วนหนึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบที่ควบคุมการทำงานโดยออปแอมป์ B ให้ผลในการแบ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลัง T_1 และ T_2 ให้เท่าๆ กันเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากการต้องรับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกินค่าที่จำกัดไว้ ซึ่งแต่ละตัวรับได้ไม่เกินประมาณ 1500 โวลท์ ในรูป 4.20 จุด C ในวงจรคือจุดแบ่งครึ่งของความต่างศักย์ทั้งหมดที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัว และออปแอมป์ B จะใช้เป็นจุดอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่จุด D เมื่อใดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์กำลัง T_2 มากกว่าความต่างศักย์ตกคร่อมที่ทรานซิสเตอรกำลัง T_1 ศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด D ออปแอมป์ B จะส่งความต่างศักย์ไปเพิ่มการทำงานของทรานซิสเตอร์ T_2 ทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 มีการนำกระแสมากขึ้นและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าความต่างศักย์ตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์กำลัง T_2น้อยว่าความต่างศักย์ตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์ T_1 ศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด D ความต่างศักย์ที่ออปแอมป์ B ส่งไปขับการทำงานของทรานซิสเตอร์ T2 จะลดลง ทำให้ทรานซิสเตอร์ T2 นำกระแสน้อยลงและความต่างศักย์ตกคร่อมสูงขึ้น กลไกการควบคุมเช่นนี้ ในที่สุดจะเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งความต่างศักย์ที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์

กำลังทั้งสองเท่ากัน หรือศักย์ไฟฟ้าที่จุด C เท่ากับศักย์ไฟฟ้าที่จุด D

วงจรจำกัดกระแสที่ประกอบลงกล่องเรียบรอยแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.21 ในการใช้งานวงจรจำกัดกระแสถูกต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูงและขั้วของการดิสชาร์จตามแผนผังในรูปที่ 4.22 สัญญลักษณ์ A เป็นแอมมิเตอร์ที่จะอ่านกระแสการดิสชาร์จ ส่วนสัญญลักษณ์ V คือ โวลท์มิเตอร์ที่จะอ่านความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายวงจรจำกัดกระแสซึ่งประกอบสำเร็จ



รูปที่ 4.22 การต่อวงจรจำกัดกระแสกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโวลท์สูงและขั้วของการดิสชาร์จ

2. การทดสอบการทำงานของวงจรจำกัดกระแส

การทดสอบการทำงานของวงจรในขั้นต้น กระทำโดยต่อตัวต้านทานในตำแหน่งขั้วของการดิสชาร์จ ให้ทำหน้าที่เป็นโหลด(Load) แทนระบบดิสชาร์จ ปรับความต่างศักย์อ้างอิงไว้คงที่(ปรับที่ VR_{ref}) เพื่อตั้งค่ากระแสสูงสุดที่ยอมให้ผ่าน Load หรือค่ากระแสจำกัด(limitted current) จากนั้นป้อนความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิด ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับวัดกระแสที่ผ่านโหลด และวัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสอง ได้สังเกตุเห็นว่า

- เมื่อกระแสที่ผ่านโหลด (I) สูงถึงค่ากระแสสูงสุดที่ตั้งไว้ กระแสก็จะถูกจำกัดให้คงที่ การเพิ่มความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่อไปอีกจะไม่ส่งผลให้กระแสเพิ่มขึ้น โดยความต่างศักย์ส่วนเกินจะแบ่งตกคร่อมอยู่ที่ทรานซิสเตอร์กำลังแต่ละตัวด้วยค่าที่เท่าๆกัน(หรือแตกต่างกันไม่เกิน 20 โวลท์) และทรานซิสเตอร์ทั้งสองไม่มีการสั่น(oscillate) ที่ความถี่สูง แต่อาจมีการกระเพื่อมของความต่างศักย์เล็กน้อยโดยความสูงจากยอดถึงยอดไม่เกิน 15 โวลท์

- ถ้าลัดวงจรที่โหลด (เปรียบเทียบได้กับการอาร์คของการดิสชาร์จ) กระแสในวงจรจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่าซึ่งตั้งไว้ และความต่างศักย์เกือบทั้งหมดที่ป้อนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในขณะนั้น จะแบ่งไปตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์กำลังแต่ละตัวด้วยค่าที่เท่าๆกัน (หรือแตกต่างกันไม่เกิน 20 โวลท์) และทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัวไม่มีการสั่น(oscillate)ที่ความถี่สูงเช่นเดียวกัน

- ขณะที่วงจรทำงานในสภาพจำกัดกระแส ทั้งในขณะมีโหลดหรือลัดวงจรที่โหลด ถ้ากำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่ามากเกินพอ ก็จะสามารถปรับกระแสได้ด้วยการปรับค่าความต้านทาน VR_{ref} โดยที่การแบ่งแรงดันที่ทรานซิสเตอร์กำลังยังคงเกิดขึ้น และทรานซิสเตอร์กำลังไม่มีการสั่น(oscillate)

สำหรับในการทดสอบกับระบบโกลวดิสชาร์จก็จะต่อวงจรตามรูปที่ 4.22 หลังจากป้อนกาซอาร์กอนเข้าภาชนะสุญญากาศจนกระทั่งเพียงพอสำหรับสร้างการดิสชาร์จได้แล้ว จะกระทำในทำนองเดียวกับตอนทดสอบกับโหลด เริ่มด้วยการปรับความต่างศักย์อ้างอิงไว้คงที่ (ปรับที่VR_{ref}) เพื่อตั้งค่ากระแสจำกัด จากนั้นป้อนความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าจนกระทั่งเกิดการดิสชาร์จ ซึ่งพบว่า

- ขณะที่ยังไม่เริ่มการดิสชาร์จ(ความต่างศักย์ยังไม่ถึงค่าพังทลาย) ความต่างศักย์ที่ป้อนทั้งหมดจะตกคร่อมอยู่ที่ระหว่างคาโธดกับอาโนดของการดิสชาร์จ แสดงว่าทรานซิสเตอร์กำลังทั้งสองตัวอยู่ในสภาพทำงานเต็มที่

- เมื่อการดิสชาร์จเริ่มขึ้น ถ้ากระแสของการดิสชาร์จต่ำกว่าค่ากระแสจำกัดที่ตั้งไว้ ความต่างศักย์ที่ป้อนทั้งหมดจะยังตกคร่อมอยู่ระหว่างคาโธดกับอาโนดของการดิสชาร์จ ถ้ากระแสการดิสชาร์จมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าค่ากระแสจำกัด อาจเนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์ที่ป้อนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า การเพิ่มของความดันกาซ หรือเนื่องจากการอาร์คซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า กระแสการดิสชาร์จจะถูกจำกัดให้เท่ากับค่ากระแสจำกัด ส่วนความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วของการดิสชาร์จจะมีค่าสอดคล้องตามลักษณะสอของการดิสชาร์จขณะนั้น ความต่างศักย์ส่วนเกินจากที่โกลวดิสชาร์จต้องการจะตกคร่อมที่ทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรจำกัดกระแสและแบ่งค่าเท่าๆกัน

- ระหว่างเกิดการดิสชาร์จ ถ้าป้อนความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้มากเกินพอสำหรับการดิสชาร์จ จะสามารถปรับกระแสของการดิสชาร์จด้วยการปรับความต้านทาน VR_{ref} ของวงจรจำกัดกระแส โดยที่กลไกการแบ่งแรงดันที่ทรานซิสเตอร์กำลังยังคงเกิดขึ้นและทรานซิสเตอร์กำลังไม่มีการสั่น(oscillate) การทำงานในสภาพเช่นนี้วงจรจำกัดกระแสจะเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับการดิสชาร์จ

จากการทดสอบการทำงานสรุปได้ว่า วงจรจำกัดกระแสที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำงานกับระบบดิสชาร์จได้ใน 2 ลักษณะ คือ อย่างแรกให้ทำงานเป็นตัวป้องกันกระแสสูงเนื่องจากการอาร์คอย่างเดียว โดยในระหว่างที่มีการดิสชาร์จจะตั้งค่ากระแสจำกัดให้อยู่ในช่วงที่สูงกว่ากระแสของการดิสชาร์จที่จะใช้งาน การทำงานอีกลักษณะหนึ่งจะให้วงจรจำกัดกระแสทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ให้กับการดิสชาร์จ ซึ่งนอกจากจะป้องกันการอาร์คแล้ว ยังเป็นการกำหนดกระแสการดิสชาร์จให้คงที่อีกด้วย ลักษณะเช่นนี้เอื้อให้เกิดความสะดวกทั้งในด้านการวัดเพื่อศึกษาลักษณะสอของการดิสชาร์จ และการควบคุมสภาวะการดิสชาร์จในขณะเคลือบฟิล์ม

ในการนำวงจรจำกัดกระแสไปใช้ควบคุมการดิสชาร์จพบว่า ไม่ปรากฏการอาร์ครุนแรง นอกจากประกายการอาร์คเล็กๆ เป็นบางครั้ง(อาจเนื่องจากมีผงวัสดุที่เกาะบนผิวเป้า)ซึ่งไม่ส่งผลรบกวนการดิสชาร์จโดยรวมแต่อย่างใด แสดงว่าวงจรนี้ใช้งานได้ดีตามวัตถุประสงค์

ระบบสุญญากาศ

ระบบปั๊มสุญญากาศประกอบด้วย ปั๊มโรตารี่ (rotary pump) และปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) พร้อมด้วยกับดักไนโตรเจน (liquid nitrogen trap) ทำงานร่วมกัน (ดูรูปที่ 4.1) ระบบปั๊มสุญญากาศทั้งชุดนี้สามารถปั๊มความดันในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุดประมาณ $3x10^{-3}$ มิลลิบาร์ (2.3 มิลลิทอรร์) ขณะที่ความดันกาซอาร์กอนที่ใช้ในการดิสชาร์จมีค่าอยู่ระหว่าง $1x10^{-2}$ - $1.2x10^{-1}$ มิลลิบาร์ (7.5-90 มิลลิทอรร์)

การปฏิบัติงานเพื่อปั๊มภาชนะสุญญากาศให้พร้อมสำหรับการทำงาน มี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ ปั๊มหยาบ ซึ่งจะกระทำหลังจากเปิดภาชนะสุญญากาศให้ติดต่อกับบรรยากาศภายนอกเพื่อเปลี่ยนตัวอย่างหรือใส่วัสดุรองรับ ภาชนะสุญญากาศจะถูกปั๊มผ่านวาล์หยาบ (roughing valve) เข้าสู่ปั๊มโรตารี่โดยตรง ในขณะที่วาล์วตัวอื่นๆที่เหลือ คือ วาล์วหลัก (main valve) และวาล์มทางอ้อม(backing valve)อยู่ในตำแหน่งปิด ในขั้นตอนปั๊มหยาบนี้จะได้ความดันกาซในภาชนะสุญญากาศต่ำสุดประมาณ $3x10^{-2}$ mbar หลังจากนี้จะเริ่มขั้นตอนต่อไป คือ การปั๊มเพื่อให้ได้สุญญากาศดีที่สุด ในขั้นตอนนี้เป็นการทำงานร่วมกับของระบบปั๊มทั้งระบบ กาซที่ยังเหลือในภาชนะสุญญากาศถูกปั๊มผ่านวาล์วหลักเข้าสู่กับดักไนโตรเจนเหลว ปั๊มแพร่ไอน้ำมัน ผ่านวาล์วทางอ้อม และปั๊มโรตารี่ตามลำดับ กับดักไนโตรเจนเหลวซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไอน้ำมันจากปั๊มแพร่ไอน้ำมันแพร่เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จะได้รับการเติมไนโตรเจนเหลวตลอดเวลาที่ปั๊มแพร่ไอน้ำมันทำงาน ความดันกาซในภาชนะสุญญากาศจะลดลงสู่ค่าต่ำสุดหลังจากที่ปั๊มแพร่ไอน้ำมันทำงานเต็มที่ประมาณ 1 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย