บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอร์ริงที่สร้างขึ้น ได้ถูกใช้สำหรับการศึกษาใน 3 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ ลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ การเคลือบฟิล์มบางของโลหะโมลิบดินัม และการเคลือบฟิล์มบางของโลหะผสมทองแดงกับอินเดียม

การศึกษาลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์และความดันของการดิสชาร์จ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาส่วนนี้เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบ ขอบเขตการทำงานของระบบ ซึ่งจะได้ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบและการควบคุมการดิสชาร์จเมื่อใช้ระบบในการเคลือบฟิล์มบางต่อไป

ขั้นตอนการศึกษาลักษณะส่อของการดิสชาร์จ ประกอบด้วย

- การสังเกตุผลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อการดิสชาร์จ เพื่อดูสภาพทั่วไปที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติการสร้างโกลวดิสชาร์จแบบดีซีแมกแมกนิตรอน โดยจะทดลองกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ที่มีแม่เหล็กซึ่งให้ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆกัน หัวข้อของการสังเกตุ ได้แก่ ความต่างศักย์พังทลายในการเริ่มต้นการดิสชาร์จ สถานะการดิสชาร์จหลังการพังทลายและการควบคุม และขอบเขตการเพิ่มกระแสและช่วงของความดันกาซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

- การทดลองวัดลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎี

1. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อการดิสชาร์จ

1.1 ข้อมูลจำเพาะของแม่เหล็ก

เพื่อที่จะสังเกตุผลของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อสภาพการดิสชาร์จ ได้นำแม่เหล็กแบบวงแหวน 4 อัน ซึ่งจะใช้กับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ไปวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กในบริเวณที่จะให้เส้นแรงแม่เหล็กทะลุไปปกคลุมเหนือผิวเป้า โดยใช้อุปกรณ์การวัดซึ่งเสนอไว้ในภาคผนวก ข. แม่เหล็กแต่ละอันมีขนาดและสมบัติแสดงดังตารางที่ 5.1

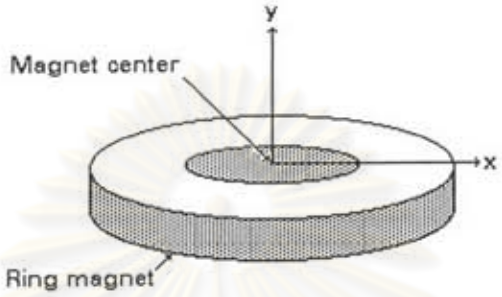
ตารางที่ 5.1 ขนาดของแม่เหล็กวงแหวนที่จะใช้กับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1

แม่เหล็กตัวที่	ขนาดแม่เหล็ก (ซ.ม.)			วัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็ก
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	ความสูง	
1	3.2	6.5	1.0	Ferrite*
2	3.2	6.0	1.0	Ferrite*
3	3.2	6.0	1.0	Ferrite*
A	4.4	5.0	0.9	Fe-Nd-B

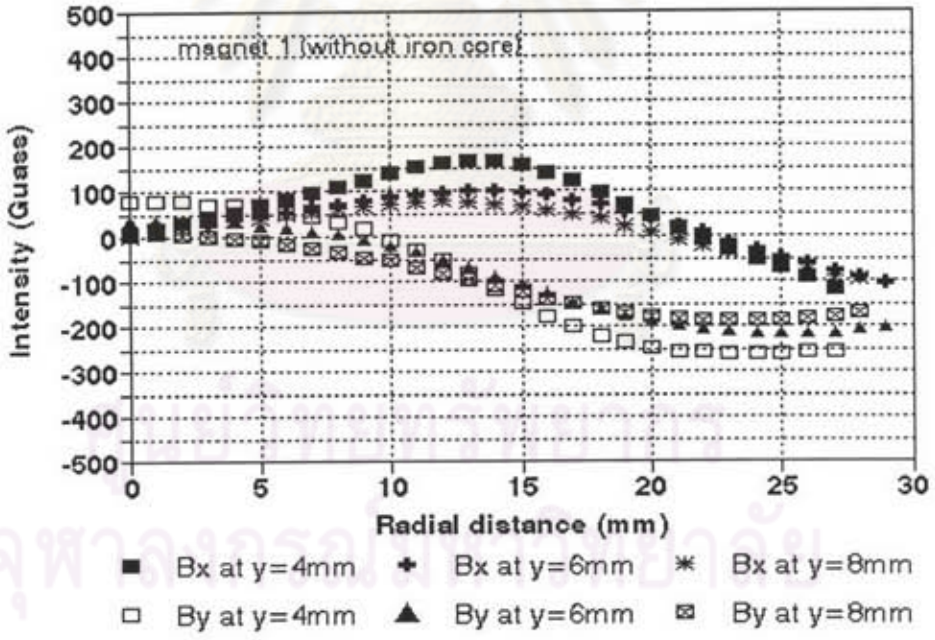
* เป็นแม่เหล็กชนิดที่ใช้ทำลำโพง สามารถซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป

ความเข้มสนามแม่เหล็กจะวัดโดยแยกเป็นสองส่วน คือความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับระนาบของแม่เหล็ก (B_x) และความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับระนาบของแม่เหล็ก (B_y) บริเวณที่วัดจะอยู่ตามแนวรัศมีของแม่เหล็ก (x) ที่ระยะความสูงจากระนาบแม่เหล็กต่างๆกัน (y) การระบุตำแหน่งของการวัดแสดงดังรูปที่ 5.1 สำหรับแม่เหล็กตัวที่ 1 และแม่เหล็กตัวที่ 2 ได้วัดเฉพาะขณะไม่มีแกนเหล็กและได้ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.3 ตามลำดับ ส่วนแม่เหล็กตัวที่ 3 และแม่เหล็ก A ได้แยกวัดทั้งไม่มีแกนเหล็กและมีแกนเหล็ก

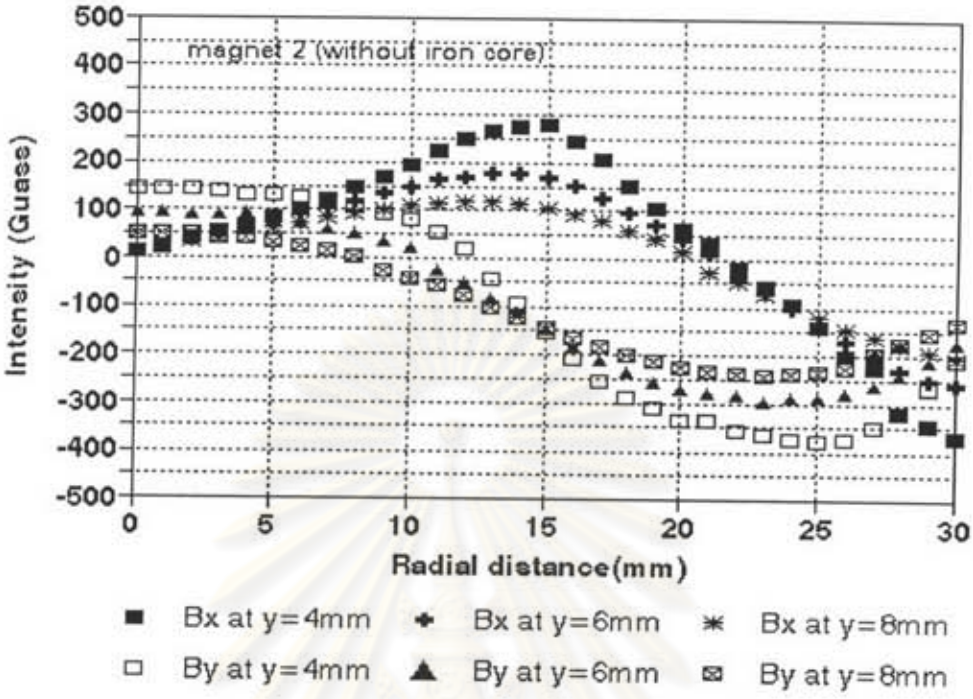
ข้อมูลการวัดของแม่เหล็กตัวที่ 3 ที่ไม่มีแกนหล็กและมีแกนเหล็กแสดงในรูปที่ 5.4ก และรูปที่ 5.4ข ตามลำดับ ส่วนข้อมูลการวัดของแม่เหล็ก A ที่ไม่มีแกนหล็กและมีแกนเหล็กแสดงในรูปที่ 5.5ก และรูปที่ 5.5ข ตามลำดับ



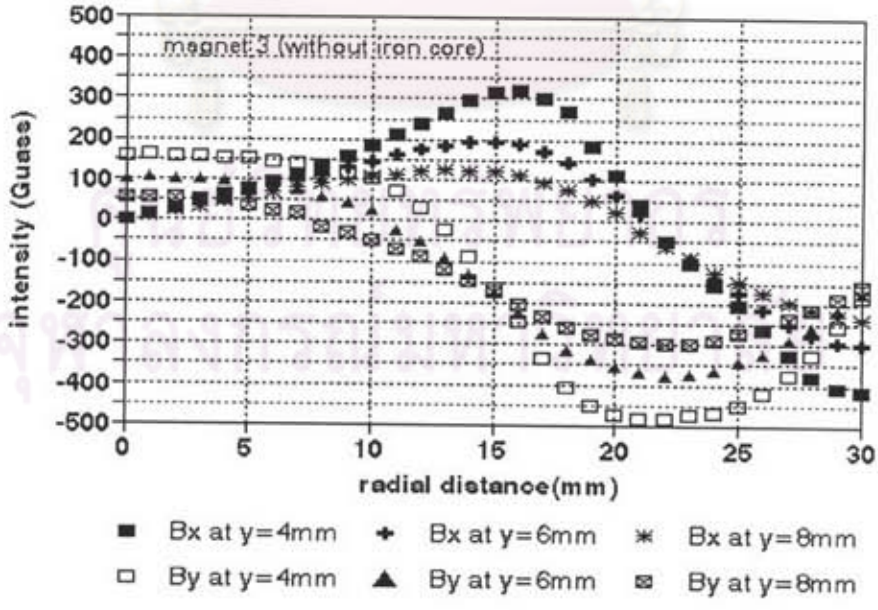
รูปที่ 5.1 การระบุตำแหน่งในการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก



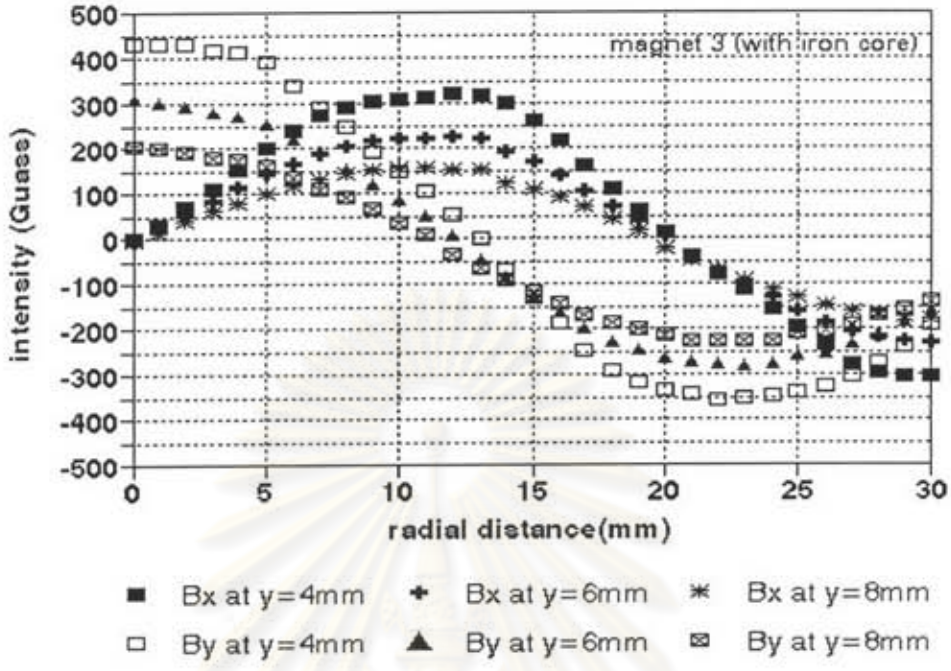
รูปที่ 5.2 กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก 1 (ไม่มีแกนเหล็ก)



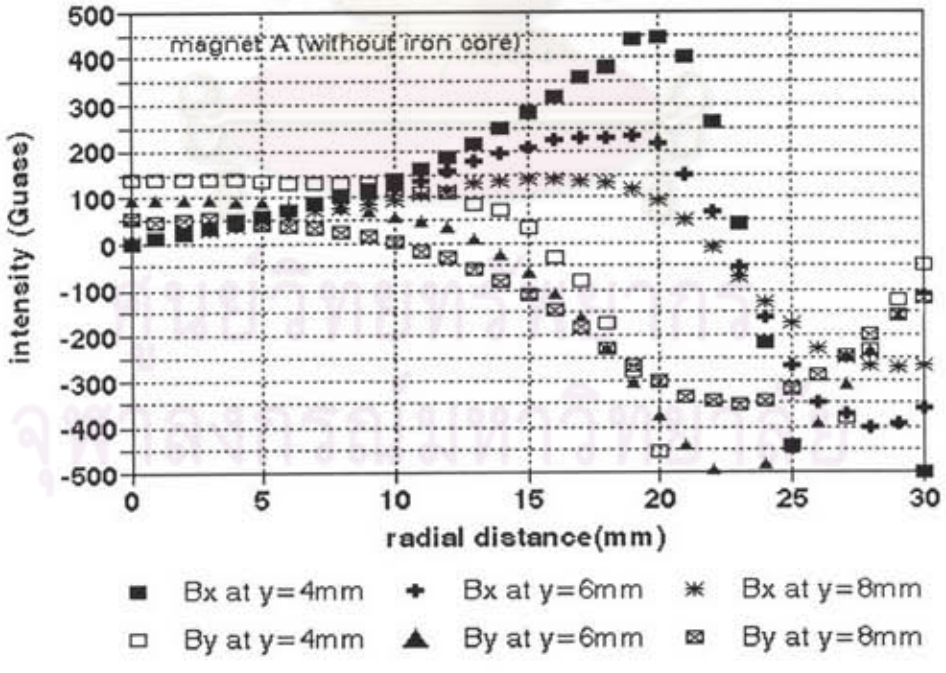
รูปที่ 5.3 กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก 2 (ไม่มีแกนเหล็ก)



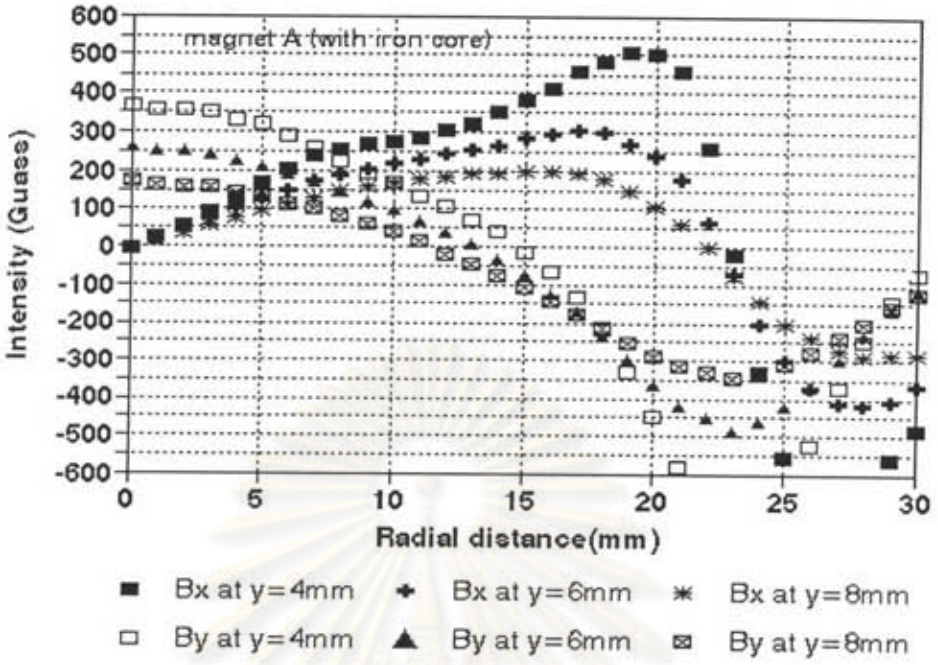
รูปที่ 5.4ก กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก 3 (ไม่มีแกนเหล็ก)



รูปที่ 5.4ข กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก 3 (มีแกนเหล็ก)

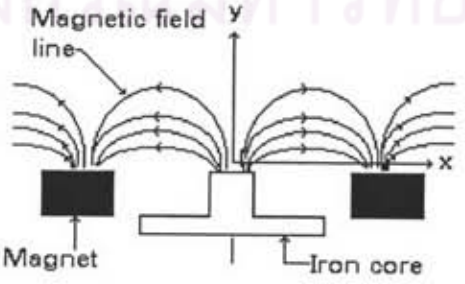


รูปที่ 5.5ก กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก A (ไม่มีแกนเหล็ก)



รูปที่ 5.5ข กราฟแสดง B_x และ B_y ของแม่เหล็ก A (มีแกนเหล็ก) [50,51]

ข้อสังเกตุจากข้อมูลการวัดสนามแม่เหล็ก ได้แก่ ความเข้มสนามแม่เหล็กจะลดลงค่อนข้างเร็วเมื่อเพิ่มระยะห่างจากแม่เหล็ก ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 5.5ข ที่ระยะ 16 มิลลิเมตรจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กในแนวขนาน (B_x) จะลดลงจาก 381 เกาส์ เป็น 286 และ 200 เกาส์ เมื่อความสูงจากแม่เหล็ก (y) เพิ่มจาก 4 มิลลิเมตรเป็น 6 และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากเครื่องหมายของความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดได้สามารถเขียนแนวของเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่จะทะลุไปปกคลุมบริเวณผิวเป้าได้ดังรูปที่ 5.6 ลักษณะของแนวเส้นแรงแม่เหล็กจะเหมือนกันสำหรับแม่เหล็กทุกตัว การใส่แกนหล็ก (เปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 5.4ก กับรูปที่5.4ข และระหว่างรูปที่ 5.5กกับรูปที่ 5.5ข) มีผลในการรวมเส้นแรงแม่เหล็ก ให้ส่วนที่ความเข้มสูงซึ่งเดิมจะมีเฉพาะในบริเวณใกล้กับตัวแม่เหล็กมาอยู่เหนือบริเวณระหว่างแกนเหล็กกับตัวแม่หล็ก



รูปที่ 5.6 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณเหนือผิวเป้า

1.2 ความต่างศักย์พังทลาย

การสร้างโกลวดิสชาร์จเพื่อสังเกตุความต่างศักย์พังทลาย กระทำหลังจากเมื่อเตรียมภาชนะสุญญากาศพร้อมแล้ว คือ ภาชนะสุญญากาศถูกปั๊มลงไปสู่ความดันต่ำสุดด้วยขั้นตอนการปั๊มหยาบและการปั๊มเพื่อให้ได้สุญญากาศดีที่สุด ตามลำดับ จากนั้นป้อนและปรับความดันกาซอาร์กอนให้ได้ค่าที่ต้องการ และตั้งค่ากระแสที่จะจำกัดโดยวงจรจำกัดกระแสไว้ที่ประมาณ 100 มิลลิแอมแปร์ เพื่อป้องกันการอาร์ค แล้วค่อยๆ ป้อนความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างคาโธดกับอาโนดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จนกระทั่งการดิสชาร์จเริ่มขึ้น (สังเกตุเห็นการเรืองแสงเนื่องจากการโกลว และกระแสการดิสชาร์จสูงกว่า 10 มิลลิแอมแปร์) สำหรับความต่างศักย์พังทลายในที่นี้ หมายถึง ความต่างศักย์สูงสุดก่อนที่การดิสชาร์จจะเริ่มขึ้น

ในขั้นต้นได้สังเกตุเปรียบเทียบความต่างศักย์พังทลายระหว่าง กรณีที่มีสนามแม่เหล็กกับไม่มีสนามแม่เหล็ก โดยทดลองกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ซึ่งติดตั้งแม่เหล็กอันที่ 1 พบว่าที่ความดันกาซอาร์กอน 80 มิลลิทอรร์ และมีแม่เหล็กวางอยู่บนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ ความต่างศักย์พังทลายมีค่าระหว่าง 400-500 โวลท์ แต่เมื่อถอดแม่เหล็กออกความต่างศักย์พังทลายจะเพิ่มขึ้นไปอยู่ในช่วง 900-1000 โวลท์

ต่อมาได้ทดลองสร้างการดิสชาร์จโดยใช้แม่เหล็กอันที่ 2 และวัดค่าความต่างศักย์พังทลายที่ความดันกาซอาร์กอนต่างๆ กัน ได้ผลดังตารางที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่แล้ว ความต่างศักย์พังทลายจะสูงขึ้นเมื่อความดันกาซลดลง นอกจากนี้ได้ทดลองถอดแม่เหล็กออก แล้วพบว่าที่ความดันต่ำกว่า 35 มิลลิทอรร์ ความต่างศักย์ 2000โวลท์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะป้อนให้กับการดิสชาร์จ ไม่สามารถกระตุ้นให้การดิสชาร์จเริ่มต้นได้

ตารางที่ 5.2 ความต่างศักย์พังทลายของการดิสชาร์จที่ความดันต่างๆกันภายใต้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กอันที่ 2

ความดัน (mTorr)	ความต่างศักย์พังทลาย (โวลท์)	ลักษณะของสนามแม่เหล็ก
30	780	ตามรูปที่ 5.3
50	440	
70	360	
90	300	

นอกจากการเปรียบเทียบความต่างศักย์พังทลายระหว่าง กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กกับมีสนามแม่เหล็ก และเปรียบเทียบเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ ที่ความดันต่างๆ กันแล้ว ได้ทดลองวัดความต่างศักย์พังทลายเมื่อเปลี่ยนความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยใช้แม่เหล็ก A ติดตั้งบนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 เพื่อเป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้า การเปลี่ยนความเข้มสนามแม่เหล็กใช้วิธีเปลี่ยนความหนาของเป้าโมลิบดินัมหนา 0.2 มิลลิเมตร เป็นเป้าโมลิบดินัมหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับผิวเป้ามากขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กที่โผล่ปกคลุมผิวเป้าจึงลดลง พบว่าที่ความดัน 30 มิลลิทอรร์ ความต่างศักย์พังทลายจะเพิ่มจาก 250 - 300 โวลท์ เป็น 350 - 400 โวลท์ เมื่อเป้าเปลี่ยนความหนาจาก 0.2 มิลลิเมตร เป็น 2 มิลลิเมตร

ผลการทดลองข้างต้นแสดงว่าการใส่สนามแม่เหล็กมีอิทธิพลต่อความต่างศักย์พังทลายอย่างมาก ซึ่งพอจะอธิบายได้โดยพิจารณาจากความต่างศักย์พังทลายตามสมการ (2.2) คือ $V_B = \frac{A(Pd)}{C+\ln(Pd)}$ ถ้าสมมุติว่าสำหรับกาซชนิดเดียวกัน A และ C คงที่และไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ความต่างศักย์พังทลายจะขึ้นความดันกาซ (P) และระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะถึงอาโนด (d) ซึ่งสำหรับในระบบดีซีโกลวดิสชาร์จระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะถึงอาโนดประมาณว่าเท่ากับระยะระหว่างคาโธดกับอาโนด แต่ในระบบดีซีแมกนิตรอนโกลวดิสชาร์จระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้จะมากขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก การที่อิเล็กตรอนมีระยะทางมากขึ้นจะทำให้ผลคูณ Pd มากขึ้นที่ความดันกาซคงที่ ดังนั้น จึงพบว่าความต่างศักย์พังทลายจะลดลงเมื่อเปลี่ยนการสร้างการดิสชาร์จของระบบจากสภาวะไม่มีสนามแม่เหล็ก (ให้ระบบเป็นดีซีโกลวดิสชาร์จ) เป็นมีสนามแม่เหล็ก(ให้ระบบเป็นดีซีแมกนิตรอนโกลวดิสชาร์จ) ที่ความดันกาซอาร์กอนคงที่ โดยการลดลงของความต่างศักย์พังทลายควรอยู่ในลักษณะเข้าใกล้จุดต่ำสุดพาสเชนจากทางด้านซ้าย (ดูรูปที่ 2.3 ประกอบ) ในกรณีที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่แล้วความต่างศักย์พังทลายเพิ่มขึ้นเมื่อลดความดันกาซ น่าจะมีสาเหตุจากผลคูณ Pd ลดลงเนื่องจากการลดความดันในขณะที่ d คงที่ ทำให้ความต่างศักย์พังทลายเพิ่มขึ้นโดยเลื่อนห่างจากจุดต่ำสุดพาสเชนไปทางซ้าย สำหรับการลดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้า แม้จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์พังทลายคล้ายกันกับกรณีลดความดันกาซ แต่มีเหตุผลในลักษณะตรงกันข้าม คือ เป็นเพราะผลคูณ Pd ลดลงเนื่องจากการลดลงของ d ในขณะที่ P คงที่ อย่างไรก็ตามการอธิบายนี้เป็นการพิจารณาอย่างคร่าวๆโดยไม่ได้ผ่านการวิเคราะห์โดยวิธีคำนวณอย่างละเอียด จึงอาจจะถูกต้องหรือคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงก็ได้ และน่าจะเป็นหัวข้อสำหรับการศึกษาวิจัยในโอกาสต่อไป

ถึงแม้ว่าการอธิบายยังไม่ชัดเจน แต่จากผลการทดลองจะสรุปในแง่ของความรู้เชิงเทคนิคได้ว่า ความต่างศักย์ขีดเริ่มของการดิสชาร์จจะขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็กและความดันกาซอาร์กอนเป็นอย่างมาก ซึ่งจะสามารถลดความต่างศักย์ขีดเริ่มได้โดยการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือผิวเป้าหรือเพิ่มความดันกาซ ในการลดความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้ากระทำได้จากการปรับระยะห่างจากแม่เหล็กถึงผิวเป้า อาจจะโดยการยกที่แม่เหล็กโดยตรงหรือหรือเปลี่ยนความหนาของเป้าก็ได้ แต่การปรับระดับของแม่เหล็กโดยตรงน่าจะเป็นวิธีที่มีความสะดวกและยืดหยุ่นมากกว่าการเปลี่ยนความหนาของเป้า

1.3 สถานะหลังการพังทลายและการควบคุม

หลังจากการดิสชาร์จเริ่มขึ้นแล้ว ระบบจะปรับตัวจนเข้าสู่สถานะคงตัวภายในช่วงเวลาสั้นๆ สถานะคงตัวนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของระบบในขณะนั้น สำหรับโกลวดิสชาร์จแบบดีซีแมกนิตรอนสถานะคงตัวหนึ่งๆ จะสามารถกำหนดโดยพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ ความดันกาซ ความเข้มสนามแม่เหล็ก ความต่างศักย์และกระแสของการดิสชาร์จ โดยในการระบุสถานะคงตัวของการดิสชาร์จจะอยู่ในลักษณะที่กล่าวถึงพารามิเตอร์ 3 ตัว เป็นตัวแปรอิสระ และพารามิเตอร์ที่เหลืออีก 1 ตัวเป็นตัวแปรตาม ตัวอย่างเช่น การดิสชาร์จที่ความดันกาซอาร์กอน 35 มิลลิทอร์ ภายใต้สนามแม่เหล็กของแม่เหล็ก 2 (ประมาณ 270 เกาส์) และความต่างศักย์ 420 โวลท์ จะให้กระแสการดิสชาร์จเท่ากับ 70 มิลลิแอมแปร์ เป็นต้น การกำหนดหรือเปลี่ยนแปลงสถานะคงตัวของโกลวดิสชาร์จทำได้โดยการปรับพารามิเตอร์เหล่านี้อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างพร้อมๆ กัน สำหรับระบบที่สร้างขึ้น การกำหนดหรือควบคุมความดันกาซในภาชนะสุญญากาศสามารถกระทำได้อิสระขณะเกิดการดิสชาร์จ ด้วยการปรับโดยตรงที่วาล์วแบบเข็มซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราไหลของกาซ กระแสการดิสชาร์จควบคุมได้สองแบบ แบบแรกใช้วิธีปรับขนาดแรงดันขาออกของวงจรกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และใช้วงจรจำกัดกระแสทำหน้าที่ป้องกันการอาร์คเพียงอย่างเดียว (ตั้งค่ากระแสจำกัดให้สูงกว่าช่วงกระแสการดิสชาร์จของระบบ) การควบคุมกระแสการดิสชาร์จอีกแบบหนึ่งใช้วิธีให้ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ โดยการปรับแรงดันขาออกจากวงจรแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้มากเกินพอสำหรับการดิสชาร์จ แล้วปรับกระแสการดิสชาร์จด้วยวงจรจำกัดกระแส ในการปฏิบัติงานควรจะเลือกวิธีหลังมากกว่า เพราะการที่วงจรจำกัดกระแสทำงานในสภาพจำกัดกระแสตลอดเวลาจะทำให้กระแสการดิสชาร์จ

คงที่และการอาร์คไม่มีโกาสเกิดขึ้น สำหรับการปรับขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือผิวเป้าขณะเกิดการดิสชาร์จไม่สามารถทำได้สะดวก โดยเฉพาะกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 และ แบบที่ 2 เนื่องจากแม่เหล็กติดอยู่กับขั้วคาโธดซึ่งมีความต่างศักย์สูง จึงมักจะปรับระยะระหว่างแม่เหล็กกับผิวเป้าไว้ก่อนที่จะเริ่มการดิสชาร์จ ดังนั้นในขณะที่เกิดการดิสชาร์จความเข้มสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตามปัญหานี้ก็ได้รับการแก้ไข เมื่อเปลี่ยนมาใช้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 ซึ่งได้ออกแบบให้สามารถปรับความสูงแม่เหล็กได้ตลอดเวลา โดยการหมุนชุดของแม่เหล็กให้เลื่อนขึ้นลงบนขั้วต่อไฟฟ้าซึ่งติดตั้งบนแกนกลางของแท่นยึดเป้า แต่มีสิ่งต้องระวัง คือ ไฟฟ้าดูด ซึ่งอันตรายมากเนื่องจากเป็นไฟฟ้าความต่างศักย์สูง แม้จะมีวงจำกัดกระแสเป็นตัวตัดกระแสก็ตาม จะต้องใช้วัสดุฉนวนไฟฟ้า เช่น แท่งแก้วเป็นตัวผลักให้ชุดแม่เหล็กหมุน

เมื่อสามารถควบคุมและกำหนดความดันกาซ กระแสการดิสชาร์จ และความเข้มของสนามแม่เหล็กได้แล้ว ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จซึ่งจะตกคร่อมระหว่างคาโธดกับอาโนดจะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระทั้งสามตัวนี้ อย่างไรก็ตามในกรณีของการควบคุมกระแสการดิสชาร์จ ด้วยการปรับแรงดันขาออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และไม่ให้วงจรจำกัดกระแสทำงานในสภาพจำกัดกระแส อาจมองในลักษณะที่ให้ความต่างศักย์เป็นตัวแปรอิสระ ส่วนกระแสการดิสชาร์จเป็นตัวแปรตามก็ได้

1.4 ขอบเขตการเพิ่มกระแสและลดความดันกาซ

สำหรับการดิสชาร์จที่ความดันกาซและสนามแม่เหล็กคงที่ กระแสของการดิสชาร์จสามารถเพิ่มได้จำกัด จากการทดลองสร้างการดิสชาร์จโดยใช้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ซึ่งติดตั้งแม่เหล็กตัวที่ 2 โดยเริ่มจากป้อนความต่างศักย์จนเกิดการดิสชาร์จ แล้วเพิ่มความต่างศักย์ช้าๆ โดยไม่มีการจำกัดกระแส เพื่อให้กระแสการดิสชาร์จขึ้นกับความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าไป กระแสจะเพิ่มตามความต่างศักย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้น ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ต่อไปอีกเรื่อยๆ กระแสการดิสชาร์จจะลดลงจนกระทั่งการดิสชาร์จหยุดไป ตัวอย่าง เช่น ที่ความดัน 35 มิลลิทอรร์ กระแสจะเพิ่มถึง 55 มิลลิแอมแปร์ เมื่อความต่างศักย์มีค่าประมาณ 570 โวลท์ หลังจากนี้ถ้าป้อนความต่างศักย์ต่อไปอีกกระแสการดิสชาร์จจะเริ่มลดลง ขอบเขตสูงสุดของกระแสนี้จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กหรือความดันกาซ สำหรับในการทดลองเพิ่มกระแสการดิสชาร์จ โดยอาศัยวงจรจำกัดกระแสเป็นตัวกำหนดกระแส

ของการดิสชาร์จ ในขณะที่ป้อนความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไว้มากเกินพอ (ทำงานในแบบที่ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวจ่ายกระแสคงที่) ก็ได้ผลในลักษณะเดียวกัน คือ สามารถเพิ่มกระแสการดิสชาร์จได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อเลยจุดนี้ไปแล้วการปรับค่ากระแสจำกัดให้สูงขึ้นไปอีก จะไม่ส่งผลให้กระแสการดิสชาร์จเพิ่มขึ้น แต่กลับทำให้ลดลง โดยจะลดลงจากจุดที่กระแสการดิสชาร์จสูงสุดมากหรือน้อย ขึ้นกับความต่างศักย์มากเกินพอที่ป้อนในขณะนั้น ถ้าความต่างศักย์นี้สูงกว่าความต่างศักย์ที่การดิสชาร์จต้องการ ณ จุดที่กระแสของดิสชาร์จสูงสุดไม่มากนัก กระแสการดิสชาร์จจะลดลงเล็กน้อย แต่ถ้าสูงกว่ามาก กระแสการดิสชาร์จอาจจะลดลงจนกระทั่งการดิสชาร์จหยุดไป ข้อควรสังเกตุ คือ ลักษณะการลดลงของกระแสการดิสชาร์จแบบนี้เป็นสภาพเดียวกันกับการทดลองในตอนต้น ซึ่งใช้วิธีเพิ่มความต่างศักย์เรื่อยๆและไม่จำกัดกระแส ทั้งนี้เนื่องจากว่า ในขณะที่เพิ่มกระแสการดิสชาร์จถึงค่าสูงสุดแล้ว การเพิ่มค่ากระแสจำกัดที่วงจรจำกัดกระแสต่อไปอีก จะทำให้กระแสการดิสชาร์จต่ำกว่าค่ากระแสจำกัด ดังนั้นวงจรจำกัดกระแสจึงหลุดจากสภาพการทำงานแบบจำกัดกระแส ความต่างศักย์ส่วนเกินที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรจำกัดกระแสจะเปลี่ยนมาตกคร่อมอยู่ที่ขั้วของการดิสชาร์จทั้งหมดในทันที และทำให้เห็นการลดลงของกระแสการดิสชาร์จในที่สุด

เมื่อสร้างการดิสชาร์จให้มีกระแสคงที่และป้อนความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงเกินพอ การลดความดันกาซจะทำให้ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมการดิสชาร์จสูงขึ้น ซึ่งเมื่อลดความดันลงถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่งแล้วกระแสการดิสชาร์จจะเริ่มลดลง และถ้าลดความดันกาซลงไปอีกเรื่อยๆกระแสจะลดลงขณะที่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนในที่สุดการดิสชาร์จจะหยุดลง ขนาดความดันกาซต่ำสุดก่อนที่กระแสการดิสชาร์จจะเริ่มลดลง จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่บริเวณใต้ผิวเป้า ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความดันต่ำสุดที่ยังสามารถได้กระแสการดิสชาร์จขนาด 50 มิลลิแอมแปร์ เปรียบเทียบระหว่างแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ที่ใส่สนามแม่เหล็กต่างๆกัน

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความดันต่ำสุดที่ยังสามารถให้กระแสการดิสชาร์จ์ขนาด 50 มิลลิแอมแปร์

แม่เหล็ก	ลักษณะของ	ความดันต่ำสุดที่กระแส
	สนามแม่เหล็ก	เริ่มลดจาก 50 mA
3	รูปที่ 5.4ก	85 mtorr
3	รูปที่ 5.4ข	5 mTorr

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

แม่เหล็ก	ลักษณะของ	ความดันต่ำสุดที่กระแส
	สนามแม่เหล็ก	เริ่มลดจาก 50 mA
A	รูปที่ 5.5ก	30 mTorr
*A	รูปที่ 5.5ก	90 mtorr
A	รูปที่ 5.5ข	น้อยกว่า 1 mTorr
*A	รูปที่ 5.5ข	15 mTorr
**A	รูปที่ 5.5ข	35 mTorr

หมายเหตุ

* หมายถึงใช้แม่เหล็กตัวเดียวกันแต่ยกแม่เหล็กสูงจากแท่นยึดเป้า 1.5 มิลลิเมตร ** หมายถึงใช้แม่เหล็กตัวเดียวกันแต่ยกแม่เหล็กสูงจากแท่นยึดเป้า 3.5 มิลลิเมตร ส่วนกรณีอื่นๆที่เหลือการวางแม่เหล็กจะแนบกับแท่นยึดเป้า ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้แม่เหล็กจะห่างจากผิวเป้าประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ดังนั้นแม่เหล็กที่ติดเครื่องหมาย * จะห่างจากผิวเป้า 4 มิลลิเมตร และแม่เหล็กที่ติดเครื่องหมาย ** จะห่างจากผิวเป้า 6 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแม่เหล็ก A กับแม่เหล็ก 3 ที่วางห่างจากเผิวเป้าเท่าๆกัน ซึ่งแม่เหล็ก A จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงกว่า จะเห็นว่าการดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็ก A จะสามารถลดความดันได้ต่ำกว่า โดยที่ยังได้กระแสของดิสชาร์จเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแม่เหล็กตัวเดียวกันที่ใส่แกนเหล็กกับไม่ใส่แกนเหล็ก การใส่แกนเหล็กช่วยให้ลดความดันกาซได้ต่ำกว่าโดยที่ยังได้กระแสการดิสชาร์เท่ากัน นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแม่เหล็กตัวเดียวกันที่วางห่างจากผิวเป้าเป็นระยะต่างๆกัน การวางแม่เหล็กให้ใกล้กับผิวเป้ามากขึ้น จะสามารถลดความดันกาซได้ต่ำกว่าโดยที่ยังได้กระแสการดิสชาร์จเท่ากัน การเปรียบเทียบทั้งหมดนี้ล้วนเป็นการเปรียบเทียบขอบเขตการลดความดันกาซระหว่างการดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงและความเข้มต่ำทั้งสิ้น ซึ่งผลทั้งหมดแสดงว่าการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าช่วยให้สามารถลดความดันกาซของการดิสชาร์จให้ต่ำลงโดยที่ยังได้กระแสการดิสชาร์จเท่าเดิม หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กทำให้สามารถขยายช่วงความดันกาซสำหรับการดิสชาร์จออกไปทางความดันต่ำได้มากขึ้น

การปรากฏขอบเขตการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จและการลดความดันกาซมีลักษณะเหมือนกัน คือเมื่อเลยขอบเขตไปแล้วความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสการดิสชาร์จลดลงจนกระทั่งการดิสชาร์จหายไป และการขยายขอบเขตทั้งสองอย่างทำได้โดยการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้า ลักษณะส่อเช่นนี้แสดงว่าอิทธิผลของสนามแม่เหล็กในการกักอิเล็กตรอนมีขอบเขตจำกัด เมื่อความต่างศักย์ของการดิสชาร์จสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งอิเล็กตรอนจะหลุดจากการกักของสนามแม่เหล็ก ทำให้การดิสชาร์จเปลี่ยนกลับไปอยู่ในสภาพใกล้เคียงกับดีซีโกลวดิสชาร์จ จึงสังเกตุเห็นกระแสการดิสชาร์จลดลง

1.5 สรุปผลเบื้องต้น

จากการสังเกตุสภาพทั่วไปในการสร้างการดิสชาร์จ พบว่า การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าจะส่งผลต่อสมบัติของการดิสชาร์ชาร์จ คือ ลดความต่างศักย์พังทลายที่ใช้กระตุ้นเพื่อเริ่มต้นการดิสชาร์จ ขยายช่วงกระแสการดิสชาร์จที่ความดันกาซคงที่ให้กว้างขึ้น และขยายช่วงความดันกาซที่ยังสามารถสร้างการดิสชาร์จให้ได้กระแสการดิสชาร์จคงที่ให้ออกไปทางด้านความดันต่ำมากขึ้น สมบัติเหล่านี้มีความไวสูงต่อการปรับสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าโดยวิธีขยับแม่เหล็กของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ขึ้นลง ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้มากแม้ระยะของการขยับอยู่ในระดับขนาดเพียง 1 มิลลิเมตร จุดนี้ควรนำไปพิจารณาเมื่อจะออกแบบแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ให้สามารถควบคุมการดิสชาร์จด้วยการปรับสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้า แหล่งการกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 ซึ่งได้จัดสร้างขึ้น (ดูบทที่ 4 หน้า 80) เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ได้รับอิทธิพลจากแนวความคิดนี้ นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบสมบัติการดิสชาร์จภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กแต่ละตัวที่นำมาทดลอง จะสรุปได้ว่าแม่เหล็ก A เป็นแม่เหล็กที่จะสามารถนำไปใช้สร้างการดิสชาร์จ แล้วให้ช่วงความดันกาซอาร์กอนที่ปฏิบัติงานได้กว้างที่สุดและให้ขอบเขตการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จสูงที่สุด รองลงมาคือ แม่เหล็กตัวที่ 3 แม่เหล็กตัวที่ 2 และแม่เหล็กตัวที่ 1 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้ว่าประสิทธิภาพของแม่เหล็ก 3 ตัวหลังนี้จะไม่สูงเท่าแม่เหล็ก A แต่การทดลองนี้ก็ได้ให้ข้อมูลในแง่ดี คือ วัสดุที่จัดหาง่ายและราคาถูกสามารถนำมาใช้งานได้ดีระดับหนึ่ง

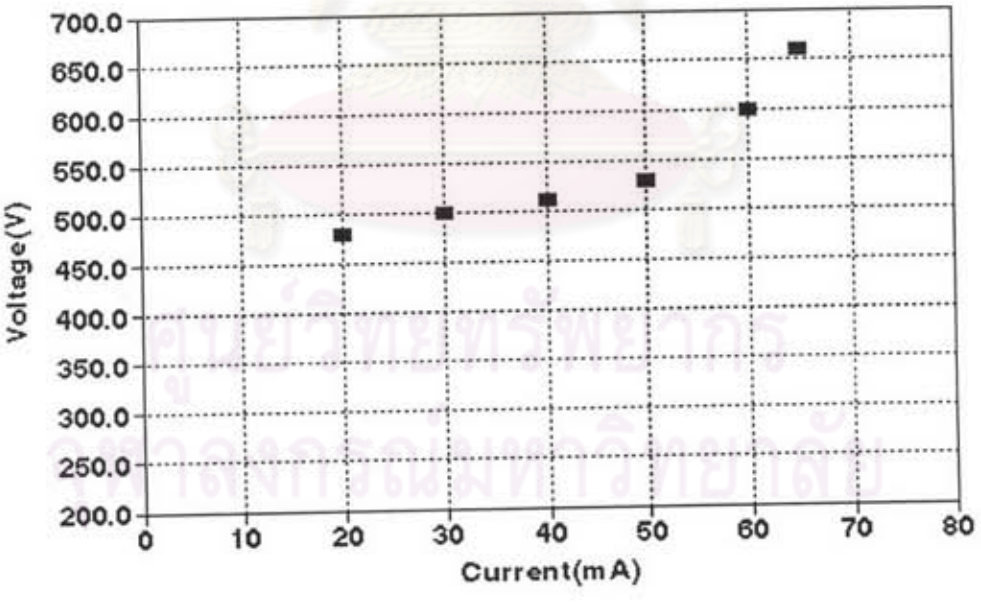
ลักษณะส่อของการดิสชาร์จจะได้รับการศึกษาในรายละเอียดมากขึ้นในหัวข้อต่อไป ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการวัดและวิเคราะห์ลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ เปรียบเทียบที่ความดันกาซและสนามแม่เหล็กต่างๆกัน พร้อมทั้งการเปรียบเทียบผลการทดลองกับความสัมพันธ์ที่มาจากการคำนวณเชิงทฤษฎี

2. การวัดลักษณะส่อของกระแส ความต่างศักย์ และความดัน

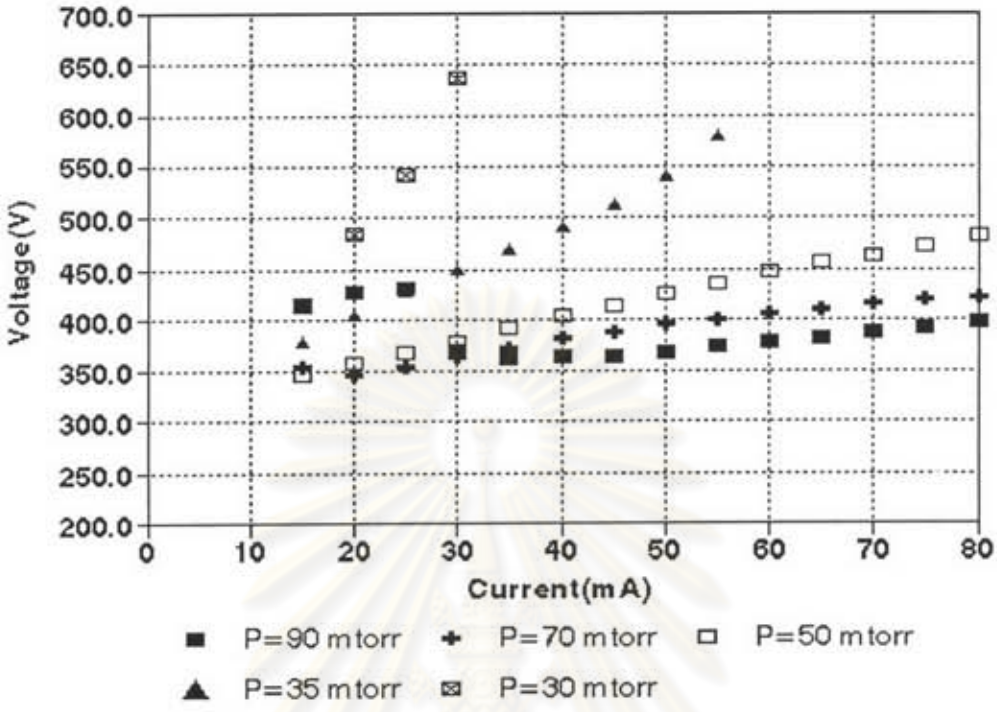
ความสัมพันธ์ของกระแส ความต่างศักย์ ความดันกาซของการดิสชาร์จ ของระบบที่สร้างขึ้น ได้ศึกษาโดยสร้างโกลวดิสชาร์จจากทั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 และแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 ภายใต้ความดันกาซอาร์กอนและสนามแม่เหล็กต่างๆกัน แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วของการดิสชาร์จ ในช่วงกระแสการดิสชาร์จระหว่าง 10-100 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎี

2.1 ข้อมูลจากการทดลอง

ลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ซึ่งติดตั้งแม่เหล็กตัวที่ 1 (ให้ความเข้มแม่เหล็กเหนือผิวเป้าตามรูปที่ 5.2) และแม่เหล็กตัวที่ 2(ให้ความเข้มแม่เหล็กเหนือผิวเป้าตามรูปที่ 5.3) แสดงดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 และแม่เหล็ก 1 ที่ความดัน 90 มิลลิทอรร์



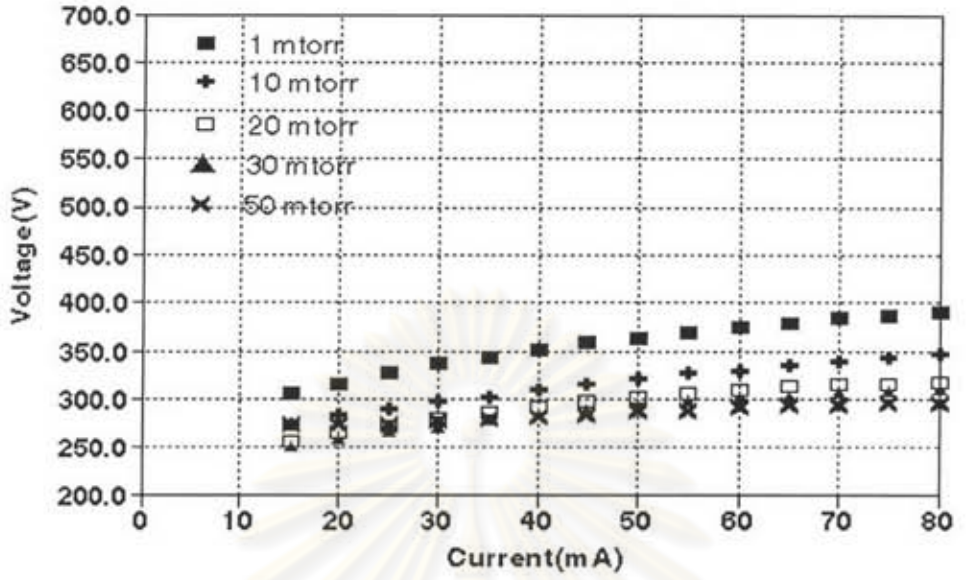
รูปที่ 5.8 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 และ แม่เหล็ก 2 ที่ความดันกาซอาร์กอน 90, 70, 50, 35 และ 30 มิลลิทอรร์

ข้อมูลเหล่านี้ได้แสดงชัดเจนขึ้นถึงขอบเขตการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จที่ความดันกาซคงที่ และขอบเขตของการลดความดันกาซที่ยังให้กระแสการดิสชาร์จคงที่ ดังที่ได้สังเกตุในหัวข้อที่ผ่านมา ลักษณะส่อการดิสชาร์จจากแม่เหล็กตัวที่ 1 (รูปที่ 5.7) มีเฉพาะที่ความดันกาซอาร์กอน 90 มิลลิทอรร์ เพราะที่ความดันต่ำกว่านี้ไม่สามารถสร้างการดิสชาร์จที่ให้กระแสการดิสชาร์จสูงกว่า 50 มิลลิแอมแปร์ และในรูปนี้กระแสการดิสชาร์จขนาด 60 มิลลิแอมแปร์ คือ กระแสการดิสชาร์จสูงสุดก่อนที่การพยายามเพิ่มความต่างศักย์เพื่อเพิ่มกระแสต่อไปอีกจะส่งผลให้กระแสลดลง สำหรับลักษณะส่อการดิสชาร์จจากแม่เหล็กตัวที่ 2 (รูปที่ 5.8) ความดันกาซต่ำสุดที่ยังสามารถให้กระแสการดิสชาร์จสูงถึง 50 มิลลิแอมแปร์ คือ 35 มิลลิทอรร์ และที่ความดันเดียวกันนี้ กระแสการดิสชาร์จขนาด 60 มิลลิแอมแปร์ คือกระแสการดิสชาร์จสูงสุด

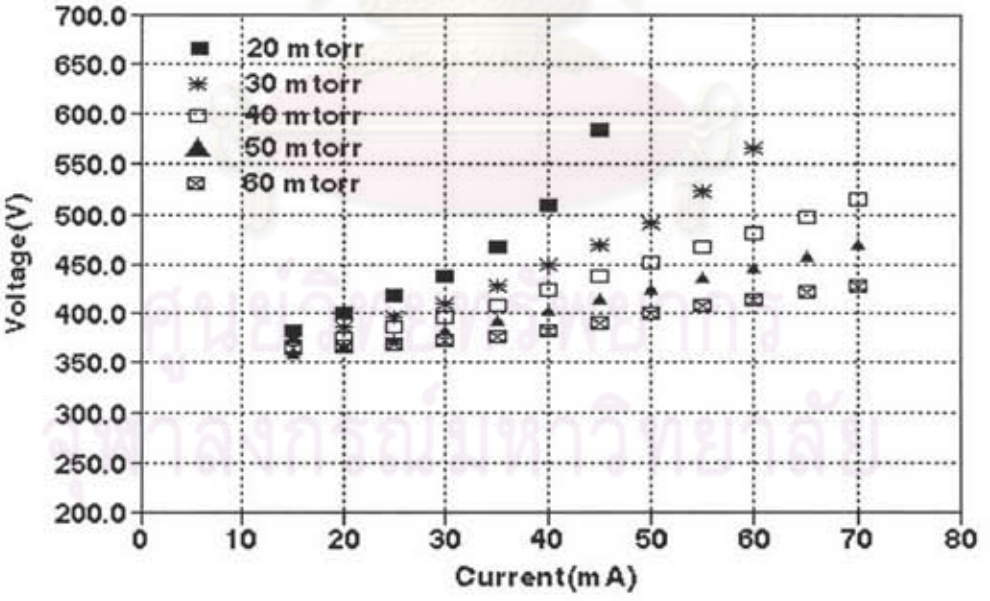
ก่อนที่การพยายามเพิ่มความต่างศักย์เพื่อเพิ่มกระแสการดิสชาร์จต่อไปอีกจะส่งผลให้กระแสการดิสชาร์จลดลง ส่วนที่ความดัน 30 มิลลิทอรร์ เมื่อกระแสการดิสชาร์จสูงถึง 30 มิลลิแอมแปร์ ก็จะเพิ่มต่อไปอีกไม่ได้ นอกจากนั้นถ้าพยายามเพิ่มกระแสการดิสชาร์จโดยการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆ จะมีผลให้กระแสการดิสชาร์จค่อยๆลดลงจนกระทั่งการดิสชาร์จหายไป สำหรับที่ความดันกาซอาร์กอน 50, 70 และ 90 มิลลิทอรร์ ยังไม่ปรากฏขอบเขตสูงสุดของการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จ ในช่วงที่กระแสการดิสชาร์จต่ำกว่า 80 มิลลิแอมแปร์ อย่างไรก็ตามการวัดลักษณะส่อในช่วงกระแสการดิสชาร์จสูงกว่านี้ ได้ยกเว้นไป เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการลดหรือสูญเสียสภาพแม่เหล็กของแม่เหล็ก เนื่องจากอัตราการระบายความร้อนออกจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ยังไม่เพียงพอ

ถ้าเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากแม่เหล็ก 1 ซึ่งให้ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนาน(B_x) ที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 165 เกาส์ และแม่เหล็ก 2 ซึ่งให้ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนาน(B_x) ที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 278 เกาส์ จะเห็นว่าความสามารถที่จะขยายช่วงความดันกาซอาร์กอนสำหรับสร้างการดิสชาร์จออกไปทางความดันต่ำมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งถ้าต้องการได้กระแสการดิสชาร์จ 50 มิลลิแอมแปร์ การดิสชาร์จภายใต้อิทธิพลสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กตัวที่ 1 จะลดความดันกาซได้ไม่ต่ำกว่า 90 มิลลิทอรร์ ขณะที่การดิสชาร์จภายใต้อิทธิพลสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กตัวที่ 2 สามารถลดความดันได้ถึง 35 มิลลิทอรร์ แสดงว่าความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือผิวเป้ามีอิทธิพลมากต่อการกำหนดลักษณะส่อของการดิสชาร์จ

เพื่อที่จะสังเกตุความไวของลักษณะส่อของการดิสชาร์จต่อการปรับความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณเหนือผิวเป้า ได้ทดลองวัดลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จซึ่งสร้างขึ้นที่ความดันกาซอาร์กอนระว่าง 1 - 60 มิลลิทอรร์ จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 ซึ่งติดตั้งแม่เหล็ก A ที่มีสนามแม่เหล็กเหนือผิวเป้าตามรูปที่ 5.5ข และติดเป้าโมลิบดินัมหนา 0.2 และ 2 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อความหนาของเป้าเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร จะได้ระยะห่างจากผิวเป้าถึงแม่เหล็กประมาณ 3 มิลลิเมตร และสอดคล้องกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 500 เกาส์ และเมื่อความหนาของเป้าเท่ากับ 2 มิลลิเมตรจะได้ระยะห่างจากผิวเป้าถึงแม่เหล็กประมาณ 5 มิลลิเมตร และสอดคล้องกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 300 เกาส์ ข้อมูลลักษณะส่อของการดิสชาร์จเมื่อเป้าหนา 0.2 และ 2 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ

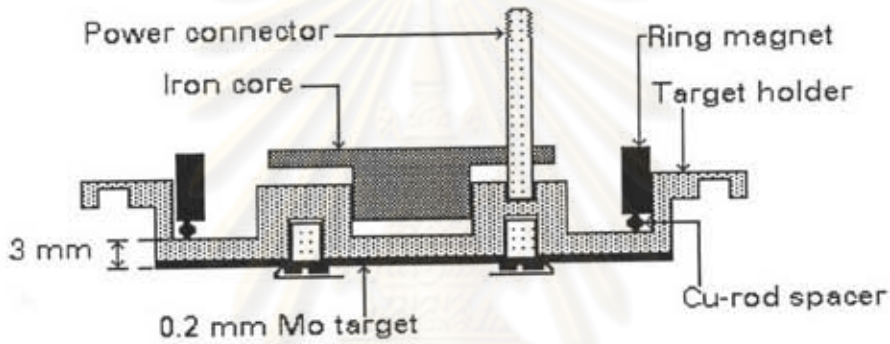


รูปที่ 5.9 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้าโมลิบดินัมหนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน กาซอาร์กอน 1, 10, 20, 30, และ 50 มิลลิทอรร์



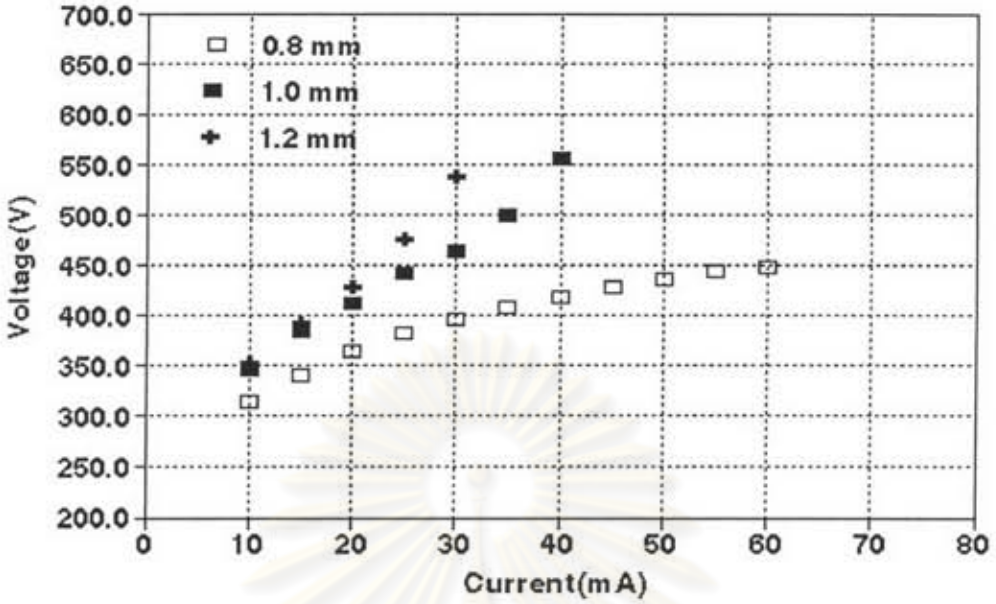
รูปที่ 5.10 ลักษณะส่อ I-Vจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 เป้าโมลิบดินัมหนา 2 มิลลิเมตร ที่ความดันกาซอาร์กอน 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิทอรร์

นอกจากนี้เพื่อสังเกตุผลที่ละเอียดขึ้นของการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีต่อลักษณะส่อของการดิสชาร์จ ได้วัดลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่ความดันกาซอาร์กอน 20 มิลลิทอรร์ และ 30 มิลลิทอรร์ จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 ที่ติดเป้าหนา 0.2 มิลลิเมตร แต่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับผิวเป้าโดยวิธียกแม่เหล็กขึ้นด้วยการวางลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน รองใต้แม่เหล็ก เพื่อเป็นตัวคั่น (spacer) ระหว่างแม่เหล็กกับแท่นยึดเป้า (ดูรูปที่ 5.11 ประกอบ)

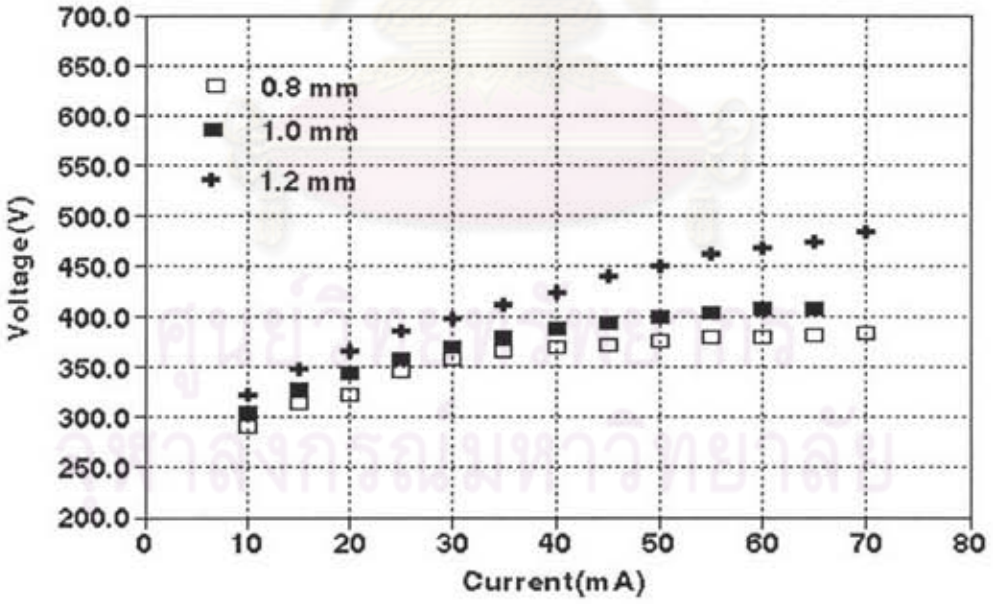


รูปที่ 5.11 การวางตัวคั่นระหว่างแม่เหล็กกับแท่นยึดเป้าบนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้เป็นตัวคั่น ได้แก่ 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งจะสอดคล้องกับระยะจากผิวเป้าถึงแม่เหล็กเท่ากับ 3.8, 4.0 และ 4.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะให้ขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 500 เกาส์ กับ 300 เกาส์ ข้อมูลลักษณะส่อของการดิสชาร์จที่ความดัน 20 มิลลิทอรร์ และ 30 มิลลิทอรร์ และมีการเปลี่ยนระยะห่างจากแม่เหล็กถึงผิวเป้าด้วยตัวคั่นขนาดต่างๆ ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้าโมลิบดินัม หนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน 20 มิลลิทอรร์ และยกแม่เหล็กด้วยตัวคั่นขนาด 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.13 ลักษณะส่อ I-V จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 เมื่อเป้าโมลิบดินัม หนา 0.2 มิลลิเมตร ที่ความดัน 30 มิลลิทอรร์ และยกแม่เหล็กด้วยตัวคั่นขนาด 0.8, 1.0 และ 1.2 มิลลิเมตร

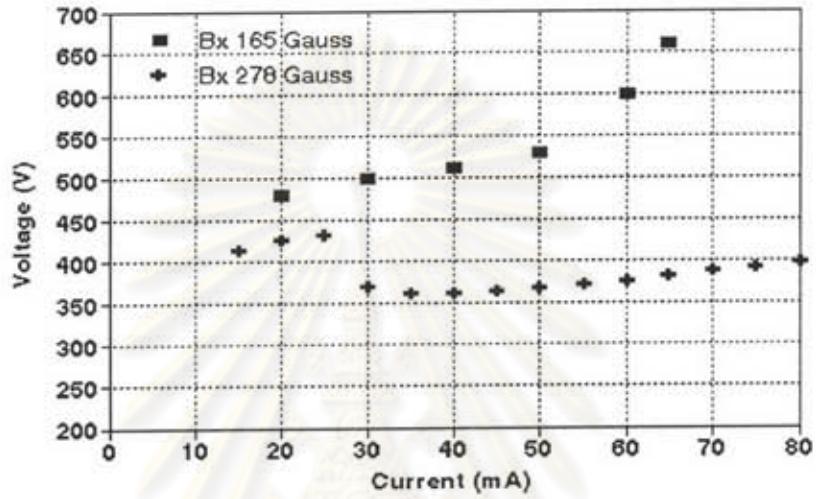
ข้อมูลลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 มีลักษณะทั่วไปคล้ายกับข้อมูลที่ได้จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 คือ แสดงให้เห็นผลของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าต่อขอบเขตการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จเมื่อความดันกาซคงที่ และขอบเขตการลดความดันกาซโดยที่ยังได้กระแสการดิสชาร์จคงที่

ในรูปที่ 5.9 เป็นลักษณะส่อของการดิสชาร์จภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็ก A ซึ่งจัดให้ได้ความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 500 เกาส์ จะเห็นว่าสามารถสร้างการดิสชาร์จได้ที่ความดันกาซอาร์กอนต่ำถึง 1 มิลลิทอรร์ โดยที่ยังไม่ปรากฏขอบเขตสูงสุดของการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จ ในช่วงกระแสของการดิสชาร์จต่ำกว่า 80 มิลลิแอมแปร์ แต่เมื่อจัดให้ความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดประมาณ 300 เกาส์ ปรากฏว่าเมื่อลดความดันกาซถึง 20 มิลลิทอรร์ จะสามารถสร้างการดิสชาร์จซึ่งให้กระแสสูงสุดได้เพียง 45 มิลลิแอมแปร์ ดังข้อมูลในรูปที่ 5.10

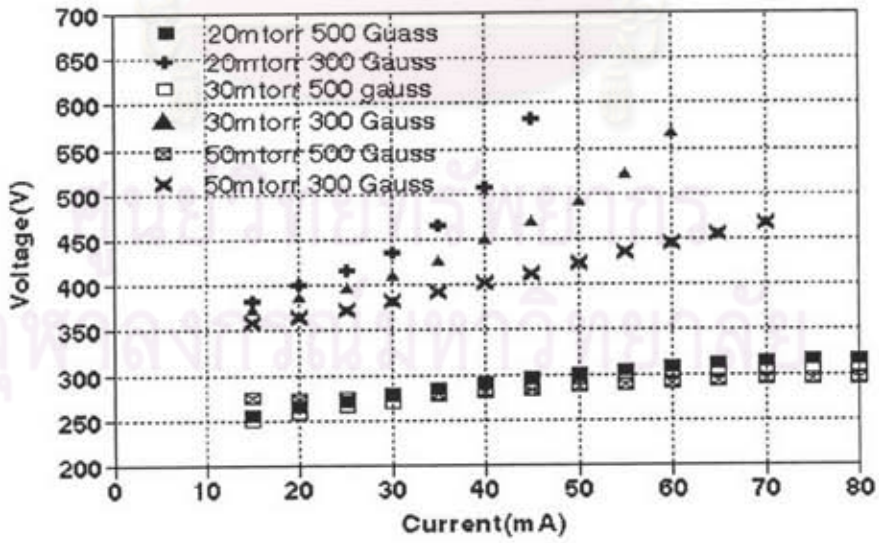
ลักษณะส่อของการดิสชาร์จในรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันกาซอาร์กอนคงที่ การลดความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าระหว่าง 500 เกาส์ กับ 300 เกาส์ สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะส่อของการดิสชาร์จอย่างเห็นได้ชัด ในรูปที่ 5.12 จะเห็นว่า ที่ความดัน 20 มิลลิทอรร์ การลดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยปรับระยะห่างจากแม่เหล็กถึงผิวเป้าให้เป็น 3.8, 4.0 และ 4.2 มิลลิเมตร จะทำให้กระแสสูงสุดของการดิสชาร์จลดลงจากมากกว่า 60 มิลลิแอมแปร์(ไม่แสดงข้อมูลในรูป) เป็น 40 และ 30 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ส่วนลักษณะส่อการดิสชาร์จที่ความดันกาซ 30 มิลลิทอรร์ ตามรูปที่ 5.13 การลดความเข้มสนามแม่เหล็กด้วยวิธีเดียวกัน ยังไม่ทำให้เห็นขอบเขตสูงสุดของกระแส แสดงว่าความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง 300-500 เกาส์ สามารถใช้ในการสร้างการดิสชาร์จที่ความดันกาซ 30 มิลลิทอรร์ ให้ได้กระแสการดิสชาร์จสูงในระดับ 70 มิลลิแอมแปร์

นอกจากขอบเขตการเพิ่มกระแสการดิสชาร์จ และขอบเขตการลดความดันกาซแล้ว สมบัติของการดิสชาร์จที่จะสังเกตุได้จาก ข้อมูลลักษณะส่อของกระแส และความต่างศักย์ คือ การเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็ก ขณะที่กำหนดให้ความดันกาซและกระแสการดิสชาร์จคงที่ เช่น จากรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นการดิสชาร์จความดันกาซอาร์กอน 30 มิลลิทอรร์ และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าระหว่าง 500 เกาส์ กับ 300 เกาส์ ถ้ากำหนดกระแสการดิสชาร์จเท่ากับ 60 มิลลิแอมแปร์ เมื่อลดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยปรับระยะห่างจากแม่เหล็กถึงผิวเป้าให้เป็น 3.8, 4.0 และ 4.2

มิลลิเมตร ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีค่าประมาณ 370, 410, และ 460โวลท์ ตามลำดับ ผลในทำนองเดียวกันนี้จะเห็นได้จากข้อมูลลักษณะส่อในรูปที่ 5.12 หรือจากการเปรียบเทียบระหว่างลักษณะส่อในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ที่ความดันกาซอาร์กอน 90 มิลลิทอรร์ ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.14 หรือจากการเปรียบเทียบระหว่างลักษณะส่อในรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ที่ความดัน 20, 30, หรือ 50 มิลลิทอรร์ ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบลักษณะส่อ I-V ที่ความดัน 90 มิลลิทอรร์ ระหว่างข้อมูลจากรูปที่ 5.7 (B_x สูงสุด 165 เกาส์) กับข้อมูลจากรูป 5.8 (B_x สูงสุด 278 เกาส์)



รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบลักษณะส่อ I-V ที่ความดัน 20, 30 และ 50 มิลลิทอรร์ ระหว่างข้อมูลจากรูปที่ 5.9 (B_x สูงสุด 500 เกาส์) กับข้อมูลจากรูป 5.10 (B_x สูงสุด 300 เกาส์)

2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์

2.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์

ข้อมูลลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่ได้จากการทดลองทั้งหมดถูกนำไปวิเคราะห์ความสอดคล้อง(fitting) กับสมการทางทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อย่อยที่ 4 หน้า 65 ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแส(I) กับความต่างศักย์ (V) ของการดิสชาร์จในรูป

$$I = \beta(V - V_0)^2 \qquad (5.1)$$

โดย β เป็นค่าคงที่ และ V_0 เป็นความต่างศักย์ที่น้อยที่สุดสำหรับการรักษาสภาพการดิสชาร์จ

ในการคำนวณได้ใช้โปรแกรมการคำนวณที่ดัดแปลงมาจากโปรแกรมที่เขียนไว้โดย ธนา[52] ซึ่งใช้การวิเคราะห์ความสอดคล้องโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดมีกระแสการดิสชาร์จ(I) เป็นตัวแปรอิสระ และความต่างศักย์ (V) เป็นตัวแปรตาม ดังนั้นในขั้นตอนการคำนวนจริง จึงเปลี่ยนสมการทางทฤษฎีข้างต้นให้อยู่ในรูป

$$V = (\beta^{-\frac{1}{2}})I^{\frac{1}{2}} + V_0 \qquad (5.2)$$

และกำหนดให้พารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ความสอดคล้อง คือ β และ V_0 ในการวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จแต่ละชุด ซึ่งได้จากการวัดที่ความดันกาซอาร์กอนและความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลการทดลองกับทฤษฎีมีค่าน้อยที่สุด และเรียกพารามิเตอร์ที่ได้ว่า เป็นพารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุด(best-fit parameter) ระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎี

2.2.2 ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

พารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ตามรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ซึ่งได้จากการทดลองกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 ที่ความดันต่างๆกันได้แสดงรวมไว้ในตารางที่ 5.4 ข้อมูลในรูปที่ 5.7 เป็นลักษณะส่อเมื่อใช้แม่เหล็กตัวที่ 1 ซึ่งจะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานสูงสุดที่ผิวเป้า 165 เกาส์ ส่วนข้อมูลในรูปที่ 5.8 เป็นลักษณะส่อเมื่อใช้แม่เหล็กตัวที่ 2 ซึ่งให้ความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานสูงสุดที่ผิวเป้า 278 เกาส์

ตารางที่ 5.4 แสดงค่า β และ V_0 ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุด
สำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8

ลักษณะส่อที่ที่วิเคราะห์	ความดันกาซ (mTorr)	β $(mA)/V^2$	V_0 (V)	ช่วงของกระแสที่สามารถวิเคราะห์ความสอดคล้องได้
รูปที่ 5.7	90	0.0029	396	เฉพาะช่วงที่ I <= 50mA
รูปที่ 5.8	30	-	-	วิเคราะห์ความสอดคล้องไม่ได้
	35	0.00046	197	เฉพาะช่วงที่ I <= 45mA
	50	0.0013	233	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	70	0.0036	274	เฉพาะช่วงที่ I >=25 mA
	90	0.0057	278	เฉพาะช่วงที่ I >=35 mA

สำหรับพารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ ตามรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ซึ่งได้จากการทดลองกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอรแบบที่ 2 ซึ่งติดแม่เหล็ก A ที่ความดันกาซอาร์กอนต่างๆกัน ได้แสดงรวมไว้ในตารางที่ 5.5 ซึ่งข้อมูลในรูปที่ 5.9 เป็นลักษณะส่อเมื่อติดเป้าหนา 0.2 มิลลิเมตร(ตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานสูงสุดที่ผิวเป้า 500 เกาส์) ส่วนข้อมูลในรูปที่ 5.10 เป็นลักษณะส่อเมื่อติดเป้าหนา 2 มิลลิเมตร (ตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานสูงสุดที่ผิวเป้า 300 เกาส์)

ตารางที่ 5.5 แสดงค่า β และ V_0 ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุด
สำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.9 และ รูปที่ 5.10

ลักษณะส่อที่ที่วิเคราะห์	ความดันกาซ (mTorr)	β $(mA)/V^2$	V_0 (V)	ช่วงของกระแสที่สามารถวิเคราะห์ความสอดคล้องได้
รูปที่ 5.9	1	0.0034	242	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	10	0.0047	218	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	20	0.0061	209	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	30	0.0067	205	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	40	0.0113	224	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	50	0.0323	247	เฉพาะในช่วง I >= 25 mA
รูปที่ 5.10	20	0.0011	268	เฉพาะในช่วง I =< 35 mA
	30	0.0011	244	เฉพาะในช่วง I =< 40 mA
	40	0.0012	240	เฉพาะในช่วง I =< 45 mA
	50	0.0017	255	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	60	0.0026	265	ตลอดช่วงที่ทำการวัด

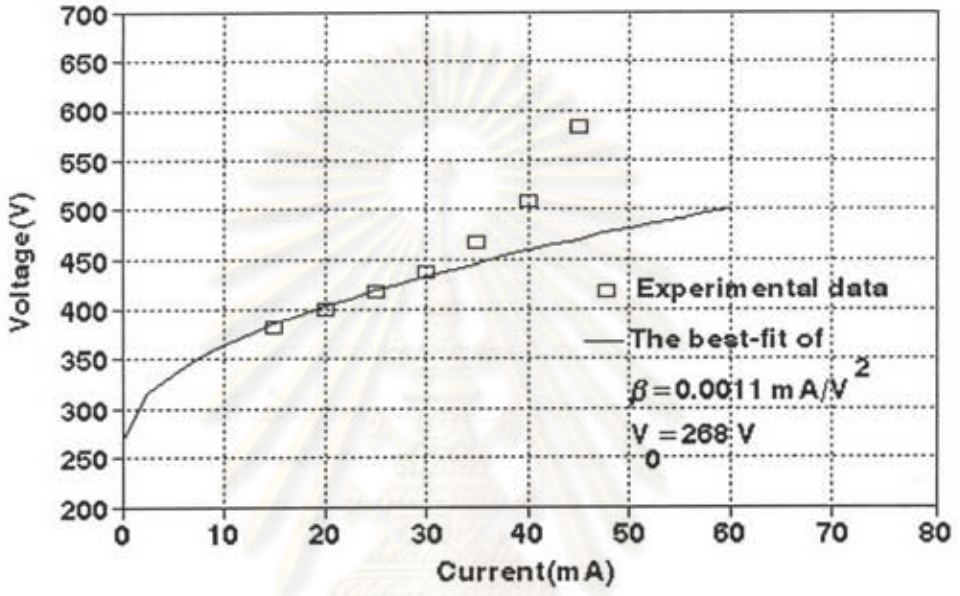
พารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ตามรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ซึ่งได้จากการทดลองกับแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2 ที่มีการเปลี่ยนความเข้มสนามแม่เหล็กแนวขนานที่ผิวเป้าสูงสุดระหว่าง 500 กับ 300 เกาส์ โดยการยกแม่เหล็กด้วยตัวคั่นขนาดต่างๆ ได้แสดงรวมไว้ในตารางที่ 5.6 ซึ่งข้อมูลในรูปที่ 5.12 เป็นลักษณะส่อที่ความดันกาซอาร์กอน 20 มิลลิทอรร์ ส่วนข้อมูลในรูปที่ 5.1 เป็นลักษณะส่อที่ความดันกาซอาร์กอน 30 มิลลิทอรร์

ตารางที่ 5.6 แสดงค่า β และ V_0 ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุด
สำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13

ลักษณะส่อที่ที่วิเคราะห์	ขนาดตัวคั่น (mm)	β $(mA)/V^2$	V_0 (V)	ช่วงของกระแสที่สามารถวิเคราะห์ความสอดคล้องได้
รูปที่ 5.12	0.8	0.0010	218	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	1	0.00036	179	สอดคล้องในช่วง I =< 40 mA
	1.2	0.00028	175	สอดคล้องในช่วง I =< 40 mA
รูปที่ 5.13	0.8	0.0026	253	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	1	0.0019	237	ตลอดช่วงที่ทำการวัด
	1.2	0.0010	223	ตลอดช่วงที่ทำการวัด

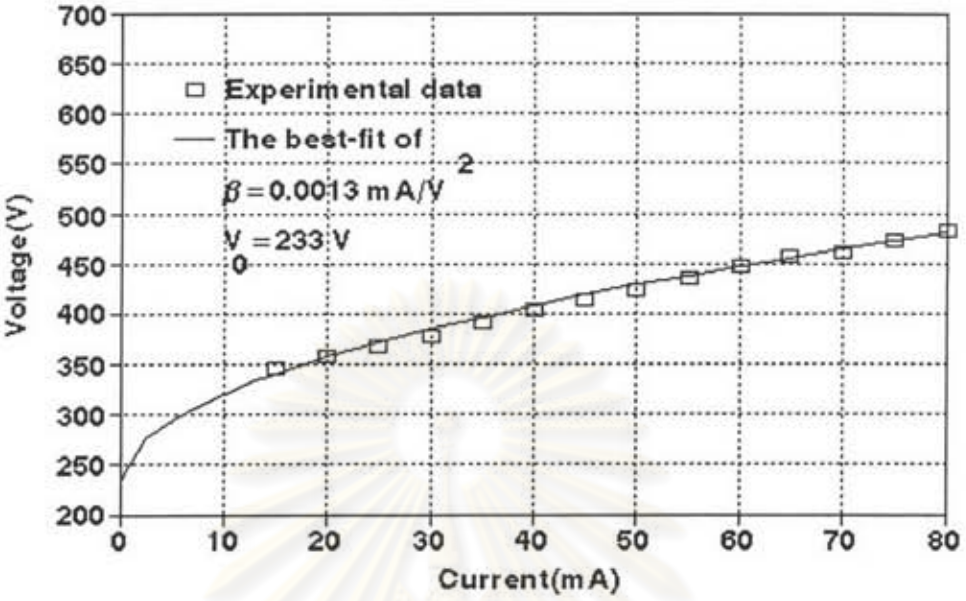
จากการวิเคราะห์ความสอดคล้องทั้งหมดข้างต้น สามารถแบ่งลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จได้สามกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นลักษณะส่อที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์สอดคล้องกับสมการทางทฤษฎีในช่วงกระแสของการดิสชาร์จแคบๆ (เฉพาะช่วงต้นของกราฟ) ซึ่งได้แก่ ลักษณะส่อในรูปที่ 5.7 ลักษณะส่อในรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 30 มิลลิทอรร์ ลักษณะส่อในรูปที่ 5.10 ที่ความดัน 20 และ 30 มิลลิทอรร์ เป็นต้น ลักษณะส่อเหล่านี้ จะได้จากการสร้างการดิสชาร์จที่ความดันกาซต่ำใกล้ๆกับขอบเขตต่ำสุดของความดันกาซที่จะสามารถลดลงไปได้สำหรับสนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่ง และมีส่วนเหมือนกัน คือ เป็นลักษณะส่อที่ปรากฏขอบเขตสูงสุดของกระแสการดิสชาร์จ ซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ของกระแสกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จสอดคล้องกับสมการทางทฤษฎีในช่วงที่กระแสการดิสชาร์จยังน้อยกว่ากระแสสูงสุด เมื่อกระแสเข้าใกล้ค่าขอบเขตสูงสุดความสัมพันธ์ก็จะเบี่ยงเบนออกไปชัดเจน ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.16 ซึ่งแสดงลักษณะส่อจากการทดลองของรูปที่ 5.10 ที่ความดัน 20 มิลลิทอรร์ เปรียบเทียบกับลักษณะส่อที่คำนวณจากสมการทางทฤษฎีโดยใช้พารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดตาม ตารางที่ 5.6 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์

จากการทดลองจะเบี่ยงเบนออกจากการคำนวณจากทฤษฎีอย่างชัดเจน เมื่อกระแสของการดิสชาร์จมากกว่า 40 มิลลิแอมแปร์ โดยเป็นไปในลักษณะที่ความต่างศักย์เพิ่มเร็วกว่าการคำนวณ นอกจากนี้ ถ้าสร้างการดิสชาร์จที่ความดันกาซต่ำกว่าช่วงความดันกาซที่จะให้ลักษณะส่อแบบที่สอดคล้องกับทฤษฎีเฉพาะในช่วงกระแสต่ำ จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ที่ไม่สอดคล้องกับสมการทฤษฎี ดังเช่นลักษณะส่อที่ความดันกาซ 30 มิลลิทอรร์ของรูปที่ 5.8

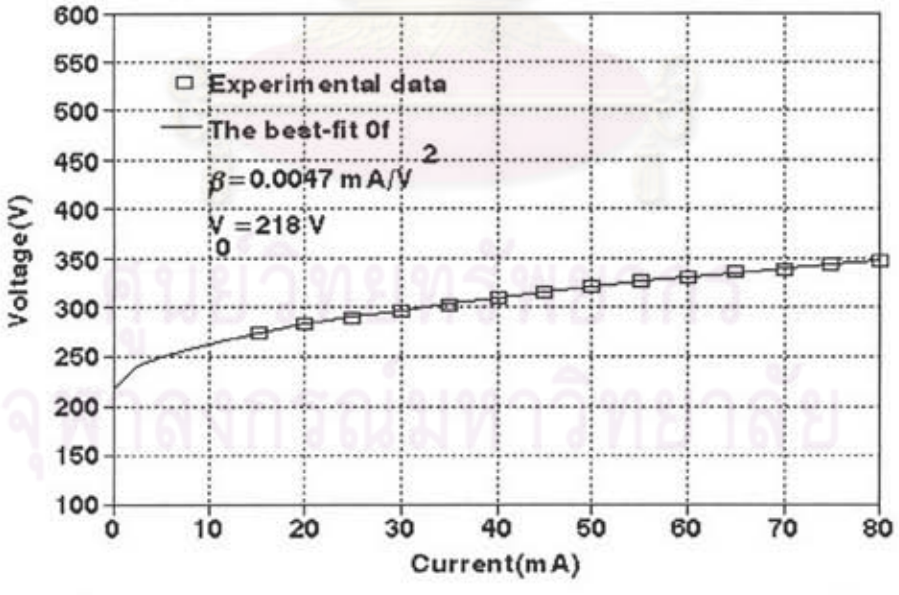


รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.10 ที่ความดัน 20 มิลลิทอรร์ กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้จาก β และ V_0 ตามตารางที่ 5.6

ลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกลุ่มที่สอง เป็นลักษณะส่อที่สอดคล้องกับสมการทางทฤษฎีตลอดช่วงกระแสที่ทำการวัด ได้แก่ ลักษณะส่อในรูปที่ 5.8 ที่ความดันกาซ 50 มิลลิทอรร์ ลักษณะส่อในรูปที่ 5.9 ที่ความดันกาซ 1,10 และ 20 มิลลิทอรร์ เป็นต้น ลักษณะส่อในกลุ่มนี้จะได้เมื่อสร้างการดิสชาร์จโดยเพิ่มความดันกาซหรือความเข้มสนามแม่เหล็กให้สูงกว่าช่วงที่จะให้ลักษณะส่อในกลุ่มแรก รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 เป็นตัวอย่างที่เปรียบเทียบระหว่างลักษณะส่อจากการทดลองกับลักษณะส่อที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ให้ความสอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลจากรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 50 มิลลิทอรร์ และรูปที่ 5.9 ที่ความดัน 10 มิลลิทอรร์ จะเห็นว่าผลการทดลองสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี

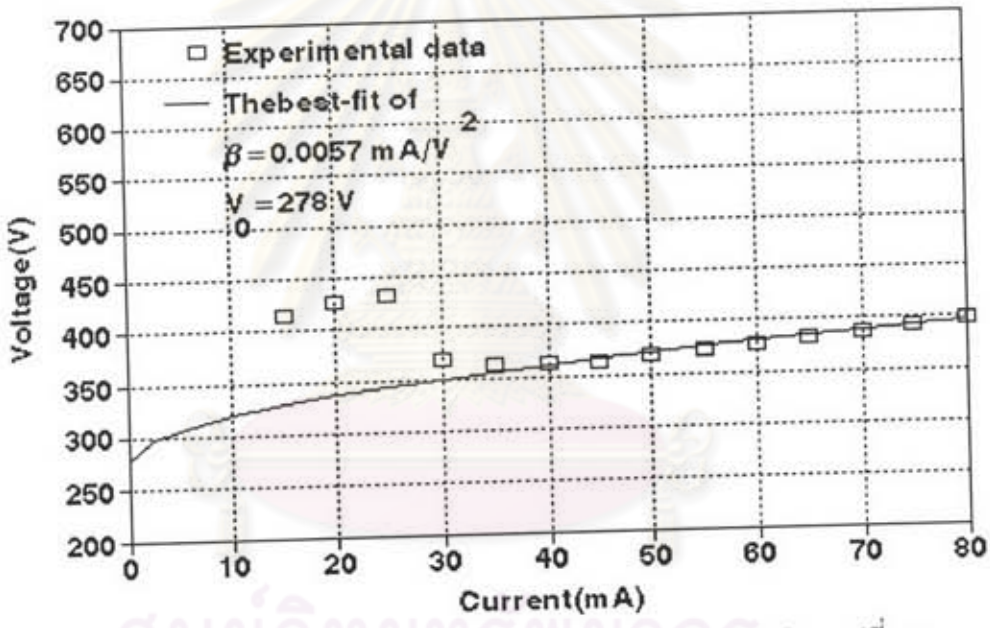


รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 50 มิลลิทอรร์ กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้จาก β และ V_0 ตามตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.9 ที่ความดัน 10 มิลลิทอรร์ กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้จาก β และ V_0 ตามตารางที่ 5.5

ลักษณะส่อในกลุ่มสุดท้ายจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับกลุ่มแรก คือจะมีความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์สอดคล้องกับทฤษฎีในช่วงที่กระแสสูงแต่จะเบี่ยงเบนออกจากความสัมพันธ์ทางทฤษฎีที่กระแสต่ำ ได้แก่ ลักษณะส่อในรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 70 และ 90 มิลลิทอรร์ ลักษณะส่อในรูปที 5.9 ที่ความดัน 50 มิลลิทอรร์ เป็นต้น ลักษณะส่อแบบนี้จะได้จากการสร้างการดิสชาร์จในช่วงความดันสูงขึ้นต่อเนื่องจากช่วงที่จะได้ลักษณะส่อในกลุ่มที่สอง รูปที่ 5.19 แสดงลักษณะส่อจากการทดลองและลักษณะส่อจากการคำนวณโดยพารามิเตอร์ที่สอดคล้องดีที่สุดสำหรับข้อมูลในรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 90 มิลลิทอรร์ จะเห็นว่าในช่วงกระแสของการดิสชาร์จต่ำกว่า 35 มิลลิแอมแปร์ กราฟจะเบี่ยงเบนจากแนวโน้มที่คำนวณจากทฤษฎี โดยความต่างศักย์จะสูงขึ้นแทนที่จะต่ำลง



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของรูปที่ 5.8 ที่ความดัน 90 มิลลิทอรร์ กับลักษณะส่อที่สอดคล้องดีที่สุดซึ่งได้จาก β และ V_0 ตามตารางที่ 5.4

การเบี่ยงเบนจากการทำนายทางทฤษฎีของลักษณะส่อในกลุ่มแรก แสดงให้เห็นถึงขอบเขตจำกัดของอิทธิพลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการเพิ่มปริมาณการไอออไนซ์ให้กับการดิสชาร์จ สาเหตุอาจเนื่องจากประสิทธิภาพของการกักอิเล็กตรอนที่ลดลงเมื่อความต่างศักย์สูงขึ้นดังที่ได้ตั้งเป็นข้อสังเกตุไว้ตอนท้ายของหัวข้อการพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กต่อการเพิ่มความดันกาซยังผลให้กับอิเล็กตรอนในบทที่ 3 หน้า 58-59 นอกจากนี้อาจเป็นผลจากการที่สนาม

แม่เหล็กซึ่งนำมาใช้ในการทดลองมีความเข้มลดลงเมื่อระยะห่างจากผิวเป้ามากขึ้น ในขณะที่การคำนวณทางทฤษฎีนั้น มาจากสมมุติฐานว่าความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือผิวเป้ามีค่าคงที่ ส่วนการเบี่ยงเบนจากการทำนายทางทฤษฎีของลักษณะส่อในกลุ่มที่สาม อาจเป็นผลของการที่ระบบพยายามปรับตัวเพื่อรักษาสภาพการดิสชาร์จในสภาวะที่กระแสการดิสชาร์จต่ำขณะที่ความดันกาซสูง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพื่อที่อธิบายกลไกที่ชัดเจนของการปรากฏลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์เหล่านี้ยังไม่ได้ปฏิบัติในงานวิจัยนี้ การเพิ่มเติมเงื่อนไขให้สนามแม่เหล็กมีความเข้มลดลงตามระยะทาง เป็นแนวทางหนึ่งที่จะเป็นไปได้ของการศึกษาวิจัยเพื่อหาลักษณะส่อที่อธิบายผลการทดลองได้

สำหรับค่าคงที่ β ของลักษณะส่อที่สอดคล้องตามสมการทางทฤษฎีพบว่ามีค่าขึ้นกับความดันกาซและความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กคงที่ ค่า β จะเพิ่มขึ้นตามความดันกาซอาร์กอน ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 การเพิ่มตามความดันของ β นี้ตรงกับที่ Westwood [48] วิเคราะห์ไว้ ส่วนเมื่อความดันคงที่ค่า β จะเพิ่มตามความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.6 ซึ่งการเพิ่มสนามแม่เหล็กอยู่ในรูปของการลดระยะจากแม่เหล็กถึงผิวเป้า

ส่วนค่าคงที่ V_0 ซึ่งเป็นความต่างศักย์ที่น้อยที่สุดที่ใช้รักษาสภาพการดิสชาร์จ พิจาณาจากจากผลในตารางที่ 5.4 และ 5.5 จะพบว่าเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าคงที่ ในช่วงที่ลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนจากจากกลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่สอง V_0 จะลดลงเมื่อเพิ่มความดันกาซ แนวโน้มเช่นนี้เหมือนกับที่ Westeood [48] รายงานไว้ แต่เมื่อความดันกาซเพิ่มขึ้นจนกระทั่งลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนจากกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่สาม V_0จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันกาซสูงขึ้น ส่วนที่ความดันกาซคงที่ จากตารางที่ 5.6 แสดงว่า V_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กลดลง

3. สรุป

จากการวัดลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ ทำให้ทราบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถสร้างการดิสชาร์จได้ที่ความดันกาซอาร์กอนอาร์กอนระหว่าง 1-70 มิลลิทอรร์ โดยให้กระแสการดิสชาร์จระหว่าง 30-80 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จระหว่าง 300-600 โวลท์ ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่จะเลือกใช้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสังเกตุความสัมพันธ์ของลักษณะส่อกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับความดันกาซอาร์กอนและความเข้มสนามแม่เหล็กโดยละเอียด ให้ประโยชน์ในเชิงปฏิบัติ คือ ได้รู้เทคนิคการปรับเปลี่ยน หรือควบคุมสภาวะของการดิสชาร์จที่จะใช้สำหรับการทดลองเคลือบฟิล์ม เช่น การลดความต่างศักย์พังทลายโดยการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กหรือลดความดันกาซอาร์กอน ทำให้ทราบว่าสามารถสร้างการดิสชาร์จที่ให้กระแสการดิสชาร์จและความต่างศักย์คงที่ได้ ที่ความดันต่างๆกันโดยการปรับความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ความรู้เชิงเทคนิคเหล่านี้น่าจะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นสำหรับการขยายขนาดพื้นที่การเคลือบฟิล์มได้เป็นอย่างดี

การวิเคราะห์ลักษณะส่อของกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จในเชิงทฤษฎี พบผลที่น่าสนใจคือ สมการทางทฤษฎีที่นำมาใช้ยังไม่สามารถใช้กับผลการทดลองได้ทั้งหมด แสดงว่าสมมติฐานที่ตั้งขึ้นในการพิสูจน์หาสมการทางทฤษฎียังไม่เพียงพอ การเพิ่มเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้งานจริงมากขึ้นเป็นหัวข้อที่ควรจะได้รับการศึกษาวิจัยต่อไป

การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโมลิบดินัม

ฟิล์มบางของโลหะโมลิบดินัมถูกเตรียมในระบบสปัตเตอริงที่สร้างขึ้น จากทั้งแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ซึ่งติดเป้าโมลิบดินัม(รายละเอียดได้เสนอไว้ในบทที่ 4) ฟิล์มถูกทดลองเคลือบบนวัสดุรองรับ 3 ชนิด คือ กระจกปิดสไลด์ขนาด 1.8x1.8 ตารางเซนติเมตร หนา 0.2 มิลลิเมตร กระจกสไลด์และกระจก corning # 7059 ขนาด 1.2x2.5 ตารางเซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ที่สภาวะการทำงานของระบบต่างๆ กัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการเตรียมฟิล์มที่มีคุณภาพดี คือ เป็นฟิล์มสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ผิวหน้าเรียบ และยึดเกาะกับวัสดุรองรับฟิล์มดี

1. การเตรียมวัสดุรองรับฟิล์ม

วัสดุรองรับทุกชิ้นจะผ่านกระบวนการทำความสะอาดซึ่งประกอบด้วย การล้างในน้ำยาล้างจานโดยขัดเบาๆด้วยฟองน้ำสังเคราะห์ และเขย่าในอ่างอุลตราโซนิค (Ultrasonic bath) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ เช่น คราบไขมันและฝุ่นละออง แล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำ

ปราศจากไอออน(de-ionized water) จากนั้นนำไปแช่ในกรดโครมิคเข้มข้น (สารละลายอิ่มตัวของโปแตสเซียมไดโครเมต (KCr_2O_4) ผสมกับกรดซัลฟุริกเข้มข้นในอัตราส่วน 1:20 โดยปริมาตร) ประมาณ 12-24 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยการเจือจางกรดลงเรื่อยๆ เมื่อแน่ใจว่าละลายกรดออกจนหมดแล้ว ก็ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยเขย่าในอ่างอุลตราโซนิคซ้ำอีกครั้ง ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเป่าให้แห้งด้วยกาซไนโตรเจนและอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C ประมาณ 30 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง

วัสดุรองรับฟิล์มที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว จะถูกนำไปชั่งมวลด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกรัม แล้วเข้าไปวางบนแท่นวางวัสดุรองรับในภาชนะสุญญากาศของระบบเคลือบฟิล์มทันทีทันที ในการเคลือบฟิล์มแต่ละครั้งจะใช้วัสดุรองรับประมาณ 1-4 ชิ้น ที่ผ่านการทำความสะอาดในคราวเดียวกัน การวางวัสดุรองรับฟิล์มบนแท่นวางวัสดุรองรับจะพยายามจัดให้อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรรอบจุดศูนย์กลางของแท่นวาง

2. การสปัตเตอร์เคลือบฟิล์ม

ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มเริ่มต้นด้วยการปั๊มเตรียมภาชนะสุญญากาศ ตามขั้นตอนการปั๊มหยาบและการปั๊มให้ได้สุญญากาศดีที่สุด โดยขั้นตอนแรกใช้เวลาประมาณ 30 นาที ส่วนขั้นตอนหลังจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง หลังจากเริ่มขั้นตอนหลังประมาณ 1 ชั่วโมงจะเริ่มตั้งอุณหภูมิที่ผิวแท่นวางวัสดุรองรับไว้ที่ 100°C เพื่อให้วัสดุรองรับอยู่ที่สภาวะสมดุลทางความร้อนกับแท่นวางวัสดุรองรับก่อนที่การเคลือบฟิล์มจะเริ่มขึ้น จากนั้นปิดปั๊มแพร่ไอน้ำมันแล้วเติมกาซอาร์กอนเข้าชนะสุญญากาศ จนกระทั่งได้ความดันกาซในภาชนะสุญญากาศสูงกว่าความดันต่ำสุดประมาณ 1000 เท่า แล้วจึงปั๊มออกให้ความดันลดลงต่ำสุด กระบวนการเติมเข้าแล้วปั๊มออก (evacuation-refill) แบบนี้ จะทำประมาณ 3 ครั้งเพื่อทำให้ระบบมีกาซอื่นเจือปนน้อยที่สุด

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเติมเข้าแล้วปั๊มออก ก็จะเติมกาซอาร์กอนเข้าในภาชนะสุญญากาศและปรับระดับของความดันให้ได้ตามต้องการ แล้วค่อยๆเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างคาโธดกับอาโนดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจนการดิสชาร์จเริ่มขึ้น แล้วปรับกระแสดิสชาร์จตามต้องการ ถึงตอนนี้การเคลือบฟิล์มก็สามารถเริ่มต้นได้เลย โดยการเคลือบฟิล์มและหยุดเคลือบฟิล์มใช้วิธีการเปิดและปิดหน้ากากตามลำดับ การเคลือบจะแบ่งเป็นช่วงช่วงละประมาณ 5-20 นาที เพื่อไม่ให้ส่วนประกอบต่างๆของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์เป้าโดยเฉพาะแม่เหล็กร้อน

เกินไป(มากกว่า 60 องศา) ระหว่างช่วงจะหยุดการดิสชาร์จประมาณ 10 -15 นาที แล้วจึงเริ่มต้นใหม่ ในตอนต้นของแต่ละช่วงของการเคลือบต้องทำการสปัตเตอร์โดยไม่เปิดหน้ากากประมาณ 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของเป้า ขั้นตอนการสปัตเตอร์ทำความสะอาดเป้านี้มีความสำคัญมากโดยเฉพาะในช่วงแรกสุดของการเคลือบฟิล์ม เนื่องจากเป้าถูกเปิดให้สัมผัสกับบรรยากาศตอนที่นำวัสดุรองรับฟิล์มเข้าสู่ระบบ

ขณะเคลือบฟิล์มอุณหภูมิที่ผิวของแท่นวางวัสดุรองรับยังคงรักษาระดับไว้ที่ 100 °C (และจะเป็นค่าคงที่สำหรับการเคลือบฟิล์มตลอดงานวิจัยนี้) และกับดักไนโตรเจนยังทำงานตลอดเวลา อุณหภูมิที่ผิวแท่นวางวัสดุรองรับถูกปล่อยให้ลดลงทันทีที่สิ้นสุดการเคลือบฟิล์ม ส่วนกับดักไนโตรเจนยังคงทำงานจนกระทั่งนำฟิล์มออกจากภาชนะสุญญากาศ

กระจกที่เคลือบฟิล์มแล้วจะนำออกจากภาชนะสุญญากาศเมื่ออุณหภูมิที่แท่นวางวัสดุรองรับลดลงสู่อุณหภูมิห้อง และจะถูกนำไปชั่งมวลอีกครั้ง ก่อนที่จะดำเนินการวิเคราะห์สมบัติต่อไป

3. การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางประกอบด้วย

3.1 การคำนวนความหนาของฟิล์ม

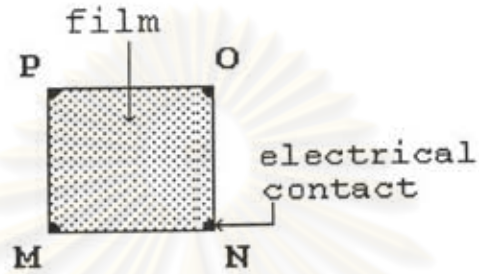
ความหนาของฟิล์มบางโมลิบดินัมคำนวณได้จากปริมาณเนื้อฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุรองรับ โดยสมมุติว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบมีการกระจายความหนาสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นเท่ากับโมลิบดินัมบริสุทธิ์ สมการที่ใช้คำนวณ คือ

$$d = \frac{m}{AD} \qquad (5.3)$$

โดย d เป็นความหนาของฟิล์มบาง m เป็นมวลของฟิล์ม A เป็นพื้นที่หน้าตัดของวัสดุรองรับ และ D เป็นความหนาแน่นของโลหะโมลิบดินัมบริสุทธิ์ซึ่งเท่ากับ 10.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางได้วัดโดยใช้เทคนิค 4 ขั้วของแวนเดอเพาว์ [53] มีขั้นตอน คือ นำฟิล์มบางที่ได้ไปทำขั้วสัมผัสไฟฟ้าที่มุมทั้ง 4 โดยใช้กาวโลหะเงิน (Silver paint) หยดลงไปเป็นจุดเล็กๆ แสดงดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 การทำขั้วสัมผัสไฟฟ้าบนฟิล์ม พร้อมกับแสดงจุดสำหรับการอ้างอิง

เมื่อได้ขั้วสัมผัสไฟฟ้าแล้ว นำฟิล์มไปวัดความต้านทานไฟฟ้าในสองรูปแบบของการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าในเนื้อฟิล์ม รูปแบบที่ 1 จะผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้ว M กับ ขั้ว N แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้ว P กับ ขั้ว O ซึ่งจะหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจากการวัดในรูปแบบที่ 1 (R_1) ได้ดังสมการ

$$R_1 = \frac{V_{PO}}{I_{MN}} \qquad (5.4)$$

โดย I_{MN} คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านระหว่างขั้ว M กับ ขั้ว N และ V_{PO} คือความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้ว P กับ ขั้ว O

การวัดความต้านทานในรูปแบบที่ 2 จะผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้ว N กับ ขั้ว O แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้ว M กับ ขั้ว P ซึ่งจะหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจากการวัดในรูปแบบที่ 2 (R_2) ได้ดังสมการ

$$R_2 = \frac{V_{MP}}{I_{NO}} \qquad (5.5)$$

โดย I_{NO} คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านระหว่างขั้ว N กับ ขั้ว O และ V_{MP} คือความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างขั้ว M กับ ขั้ว P

จากค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 และความหนาของฟิล์ม(d) จะคำนวณสภาพต้านทานของฟิล์มบาง(ρ)ได้จากสมการ

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2}[\frac{R_1+R_2}{2}]f(\frac{R_1}{R_2}) \qquad (5.6)$$

โดย $f(\frac{R_1}{R_2})$ คือ แฟคเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ซึ่งมีค่าขึ้นกับอัตราส่วน (R_1/R_2)

3.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์ม

โครงสร้างผลึกของฟิล์มจะตรวจสอบโดยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractrometer [54]

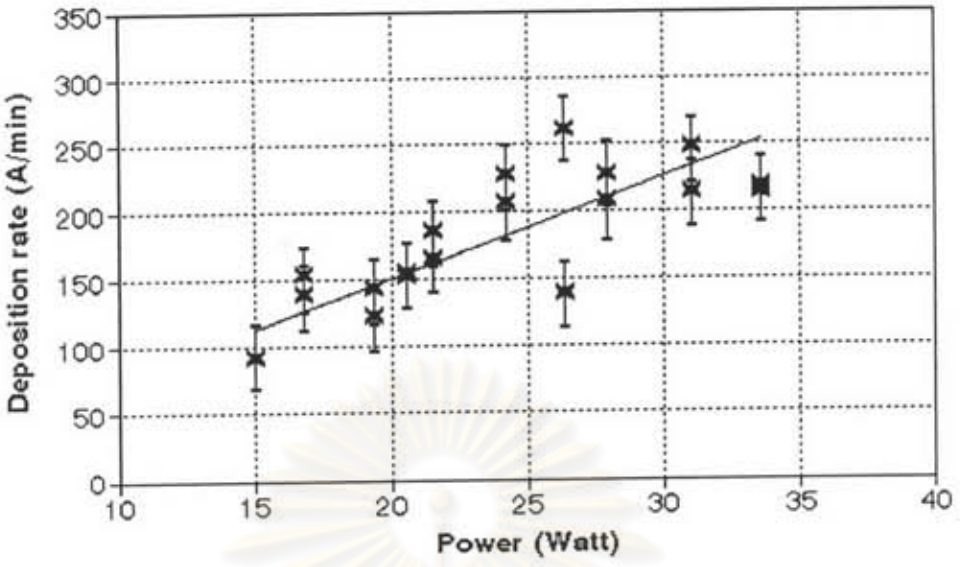
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าและองค์ประกอบของฟิล์ม

ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางที่ได้ จะวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบจะใช้เทคนิคการวัด Energy Dispersive X-ray analysys (EDXS) ซึ่งเป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ส่วนหนึ่งที่ประกอบอยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [55,56]

4. ผลการทดลอง

4.1 อัตราการเคลือบฟิล์ม

เมื่อความดันกาซอาร์กอนคงที่จะได้อัตราการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าของการดิสชาร์จ(ผลคูณระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ) แสดงดังรูปที่ 5.21 ซึ่งกราฟเส้นตรงทึบในรูปนี้เป็นเส้นที่สอดคล้องที่สุดสำหรับข้อมูลทั้งหมด และมีความชันเท่ากับ 7.5 อังสตรอมต่อนาทีต่อวัตต์

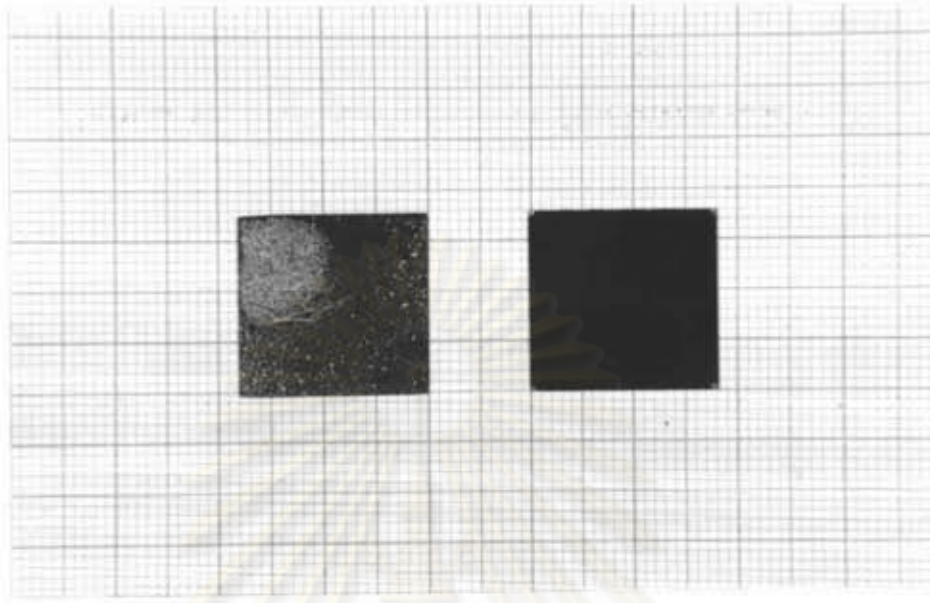


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเคลือบฟิล์มกับกำลังไฟฟ้าของการดิสชาร์จที่ความดันกาซอาร์กอน 15 มิลลิทอรร์ (ข้อมูลจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 2)

ข้อสังเกตุจากกราฟของอัตราเคลือบฟิล์มจะเห็นว่าข้อมูลของอัตราเคลือบฟิล์มมีการกระจายค่อนข้างกว้างสำหรับแต่ละค่าของกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการคำนวณความหนาของฟิล์มบางโดยการชั่งมวลมีความคลาดเคลื่อนสูงในขั้นตอนการชั่งมวล เนื่องจากเครื่องชั่งที่ใช้ยังมีความละเอียดไม่เพียงพอ นอกจากมีความคลาดเคลื่อนสูงแล้ว ในเชิงการปฏิบัติวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีที่ไม่อำนวยความสะดวกสำหรับผู้ทดลองมากนัก สำหรับในการเคลือบฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมซึ่งจะเสนอในหัวข้อต่อไป ได้เปลี่ยนวิธีการวัดความหนาของฟิล์มบางไปใช้วิธีของโทลานสกี(Tolansky method) ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยทางแสงที่จะให้ความหนาที่แท้จริงของฟิล์มบางและมีความแม่นยำในการวัดสูงกว่า

4.2 การเกาะตัวของฟิล์ม

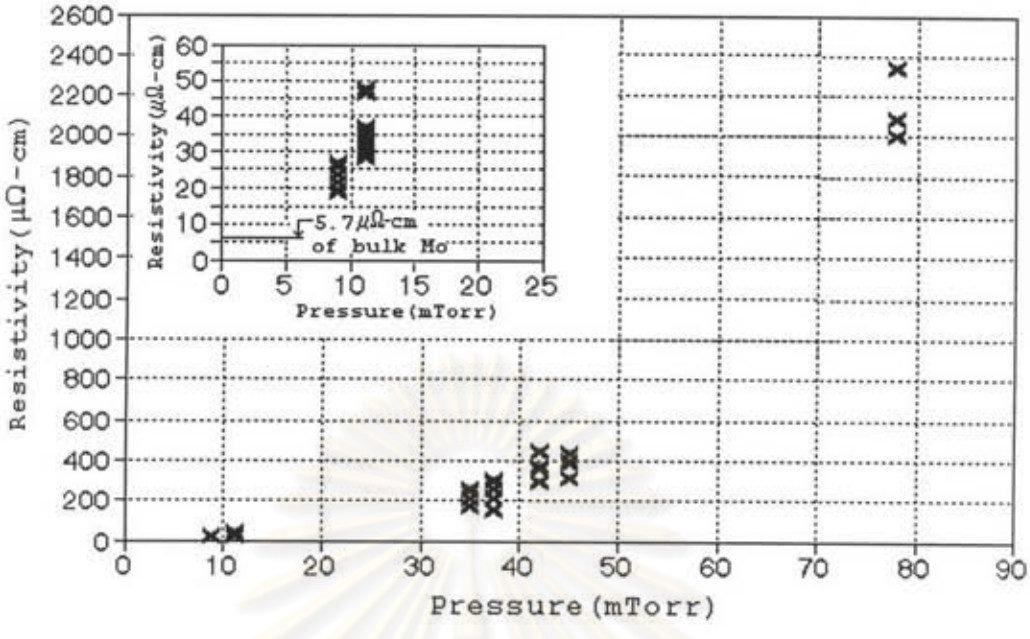
ฟิล์มบางของโมลิบดินัมที่ได้เมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่า พบว่าส่วนมากเนื้อฟิล์มเรียบสะท้อนแสงดี ยกเว้นฟิล์มบางตัวอย่างที่เกิดการลอกและไม่เกาะกับวัสดุรองรับฟิล์ม ฟิล์มที่เกิดการลอกนี้ได้จากการเคลือบที่ความต่างศักย์ต่ำกว่า 450 โวลท์ ลักษณะความแตกต่างระหว่างฟิล์มที่ลอกกับฟิล์มที่เรียบติดกับวัสดุรองรับ แสดงดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ลอก (ซ้าย)
กับฟิล์มที่เรียบติดกระจก (ขวา)

4.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซึ่งเตรียมที่ความดันกาซต่างๆกัน พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มได้รับอิทธิพลจากความดันกาซอาร์กอนขณะเคลือบฟิล์มเป็นอย่างมาก โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความดันกาซอาร์กอนลดลงจากประมาณ 80 มิลลิทอรร์ ไปยัง 10 มิลลิทอรร์ แสดงดังรูปที่ 5.23 ซึ่งรูปในกรอบเล็กที่ขยายให้เห็นในช่วงความดันต่ำเทียบกับสภาพต้านทานของโลหะโมลิบดินัมบริสุทธิ์แบบ Bulk (5.7 ไมโครโอห์ม-เซนติเมตร)

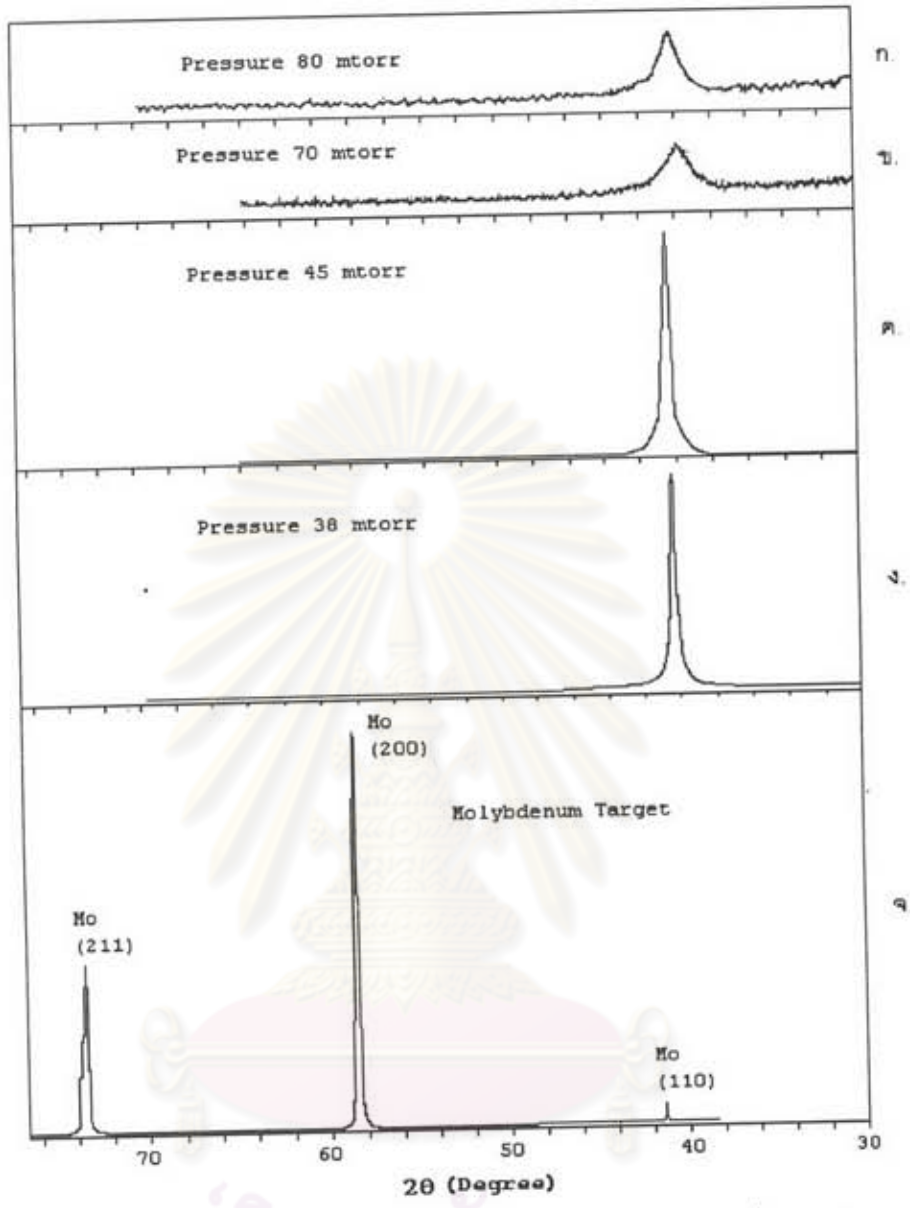


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความดันกาซอาร์กอน

จากรูปที่ 5.23 จะเห็นว่ายิ่งลดความดันกาซอาร์กอนให้ต่ำลง สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ได้ก็ยิ่งลดลงเข้าใกล้ค่าของโมลิบดินัมแบบ Bulk แต่เนื่องจากระบบที่สร้างขึ้นมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถทำงานที่ความดันต่ำกว่า 1 mTorr ได้ จึงไม่มีข้อมูลในส่วนที่ความดันต่ำลงไปอีก อย่างไรก็ตาม ก็ได้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนที่จะเตรียมฟิล์มโมลิบดินัมให้มีสภาพต้านทานใกล้เคียงหรือเท่ากับสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะโมลิบดินัม

4.4 โครงสร้างผลึก ลักษณะผิวหน้าและส่วนประกอบของฟิล์ม

จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า ไม่ปรากฏความแตกต่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มซึ่งเคลือบบนวัสดุรองรับทั้ง 3 ชนิดภายใต้สภาวะเดียวกัน แสดงว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มไม่ขึ้นกับชนิดของกระจกที่ใช้ทำวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตาม พบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นที่ความดันกาซอาร์กอนต่างกัน จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกแตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 5.24

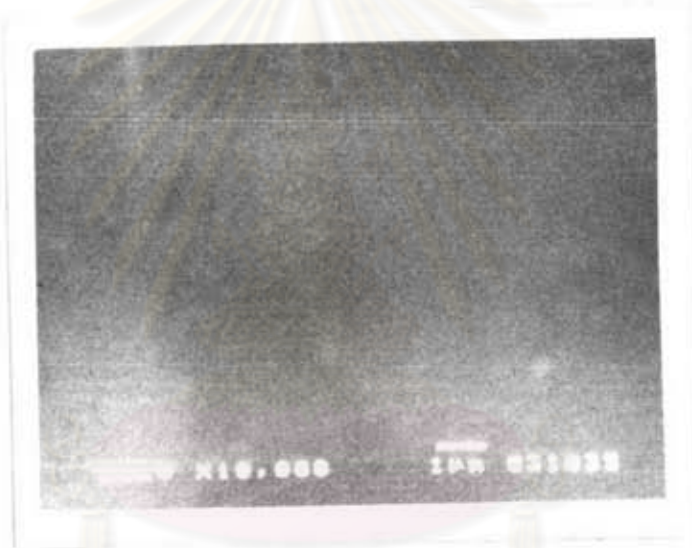


รูปที่ 5.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม Mo เตรียมที่ความดันต่างๆ เทียบกับของแผ่น Mo ที่ใช้เป็นเป้า

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 5.24 สามารถแยกฟิล์มได้เป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มที่มีโครงสร้างอสัณฐาน(amorphous) กับกลุ่มที่มีแนวโน้มของโครงสร้างผลึกเป็นแบบผลึกผหุ(polycrystalline) ที่วางตัวโดยหันระนาบ (110) ขนานกับระนาบกระจก ฟิล์มกลุ่มแรกได้จากการเตรียมที่ความดันสูงกว่า 50 มิลลิทอรร์ ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนปรากฏเป็นยอดกว้างๆ ที่ตำแหน่ง (110) (ดูรูปที่ 5.24ก และรูปที่ 5.24ข) ส่วนอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งได้จากการเตรียมที่ความดันต่ำจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนปรากฏยอดสูงชัดเจนที่ตำแหน่งของระนาบ (110) ในโครง

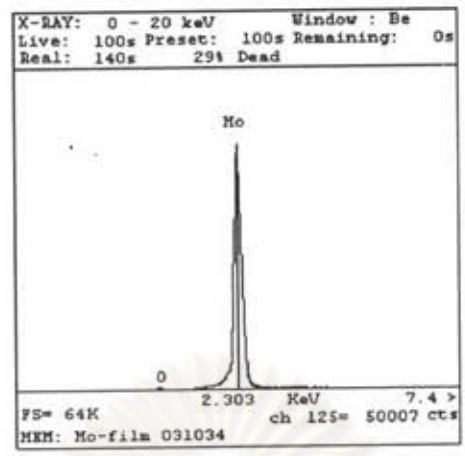
สร้างผลึกแบบ body center cubic (bcc) ของโมลิบดินัมแบบ bulk (ดูรูปที่ 5.24ค และรูปที่ 5.24ง) รูปแบบการเลี้ยวเบนของฟิล์มที่ได้นี้จะเปลี่ยนไปจากรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้จากแผ่นโมลิบดินัมที่ใช้เป็นเป้าของการสปัตเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.24จ จากลักษณะที่ผลึกจัดวางตัวแบบสุ่ม (ramdom orientation) เป็นแบบที่หันหน้าเฉพาะระนาบใดระนาบหนึ่งไปในทิศเดียวกัน(prefer orientation) ซึ่งในกรณีนี้คือหันระนาบ (110) ขนานกับวัสดุรองรับ

จากภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มกลุ่มที่มีแนวโน้มเป็นผลึกเชิงซ้อนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งแสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 5.25 สามารถยืนยันได้ว่า ฟิล์มบางโมลิบดินัมที่ได้ไม่มีรอยแตกร้าว ดังที่เคยพบจากการเตรียมฟิล์มของสุชาติ [49] และไม่พบว่าฟิล์มเกิดเป็นเกรนใหญ่ถึงระดับขนาด 1 ไมครอน



รูปที่ 5.25 ภาพผิวหน้าของฟิล์มเตรียมที่ความดัน 10 มิลลิทอรร์
ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

จากการวิเคราะห์ฟิล์มด้วย EDXS แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้ทุกตัวอย่างเป็นโลหะโมลิบดินัมเกือบบริสุทธิ์ โดยมีส่วนผสมที่เป็นออกซิเจนเจือปนอยู่เล็กน้อย ออกซิเจนเหล่านี้อาจเป็นออกซิเจนที่เจือปนอยู่ในภาชนะสุญญากาศและฝังตัวในฟิล์มขณะที่เคลือบฟิล์ม หรืออาจเป็นออกซิเจนในบรรยากาศที่จับผิวหน้าฟิล์มเมื่อนำฟิล์มออกจากระบบ รูปที่ 5.26 แสดงตัวอย่างของสเปคตรัมของการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วย EDXS



รูปที่ 5.26 สเปคตรัมของการวิเคราะห์ด้วย EDXS กับฟิล์มเตรียมที่ความดัน 10 มิลลิทอรร์

5 การอภิปรายและสรุปผล

แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มบางโมลิบดินัมตามความดันกาซอาร์กอน คือ การลดลงของสภาพต้านทาน การเกาะตัวของฟิล์มกับวัสดุรองรับ และโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น เมื่อลดความดันกาซนั้น สามารถอธิบายโดยแบบจำลองโซนที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ"โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง" หน้า 54-57 ฟิล์มบางโมลิบดินัมซึ่งเตรียมที่ความดันกาซอาร์กอนสูงกว่า 50 มิลลิทอรร์ จะมีโครงสร้างแบบโซน 1 เมื่อความดันกาซอาร์กอนต่ำลงฟิล์มบางของโมลิบดินัมที่ได้จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นแบบโซน T ถ้าพิจารณาอุณหภูมิของวัสดุรองรับขณะเคลือบฟิล์มซึ่งตั้งค่าให้เท่ากับ 100 °C สำหรับการเคลือบฟิล์มทุกตัวอย่าง จะเห็นว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจุดหลอมเหลวของโลหะโมลิบดินัม ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จากเงื่อนไขเช่นนี้ควรจะเป็นฟิล์มในโครงสร้างโซน 1 แต่ที่ความดันกาซอาร์กอนต่ำกลับได้ฟิล์มโซน T แสดงให้เห็นว่าการลดความดันกาซขณะเคลือบฟิล์มสามารถชดเชยผลที่จะเกิดจากการเคลือบฟิล์มที่อุณหภูมิรองรับต่ำได้เป็นอย่างดี

จากการทดลองเคลือบฟิล์มบางโมลิบดินัมในระบบที่สร้างขึ้น สรุปได้ว่า การเคลือบฟิล์มบางโมลิบดินัมที่มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิรองรับต่ำ จะได้จากการเคลือบภายใต้สภาวะความดันกาซอาร์กอนต่ำกว่า 30 มิลลิทอรร์ และความต่างศักย์สูงกว่า 450 โวลท์ ซึ่งฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีเหล่านี้ เมื่อนำไปทดลองใช้เป็นวัสดุรองรับสำหรับการระเหยสารประกอบคอปเปอร์อินเดียมไดซิลิไนด์พบว่าใช้ได้เป็นอย่างดี

การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมทองแดงกับอินเดียม

การวิจัยในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียม ด้วยวิธีสปัตเตอร์โลหะทั้งสองชนิดนี้ให้เคลือบลงบนวัสดุรองรับพร้อมๆกันจากเป้าของการสปัตเตอร์ที่ประกอบด้วยโลหะทั้งสองชนิดในเป้าเดียวกัน(Cu-In composite target)

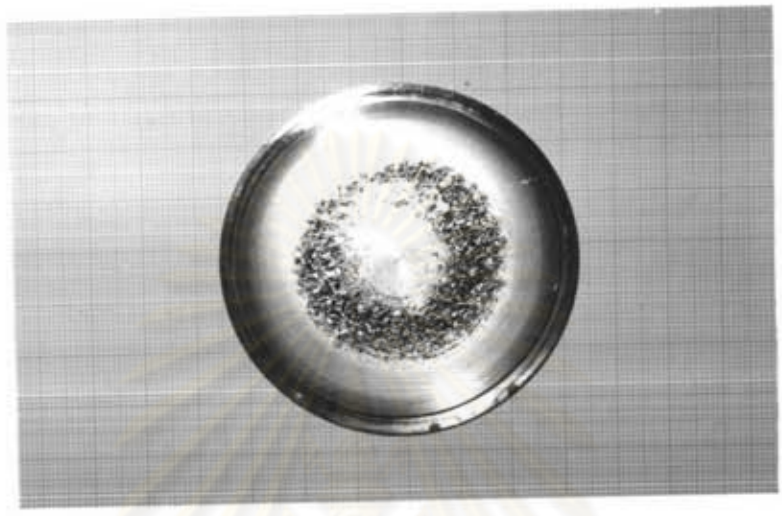
ฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมถูกเตรียมจากระบบเคลือบฟิล์มบางแบบดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงที่สร้างขึ้น โดยใช้แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 (ดูรายละเอียดในบทที่ 4)ซึ่งติดเป้าทองแดงที่ฝังโลหะอินเดียมให้กระจายสม่ำเสมอในบริเวณที่เป้าจะถูกสปัตเตอร์ด้วยอัตราส่วนพื้นที่ทั้งหมดของอินเดียมต่อพื้นที่ของทองแดงต่างๆกัน ฟิล์มบางจากเป้าแต่ละอันจะถูกเคลือบบนวัสดุรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ขนาด 1.2x2.5 ตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะการเคลือบเดียวกัน แล้วนำไปวัดสมบัติและเปรียบเทียบผลที่ได้ในเทอมของความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของอินเดียมบนเป้า

ขั้นตอนทั่วไปของการปฏิบัติงานเพื่อเคลือบฟิล์ม ได้แก่ การเตรียมวัสดุรองรับ และการสปัตเตอร์คลือบฟิล์ม รวมทั้งการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม ส่วนใหญ่ยังเหมือนกับการปฏิบัติงานเมื่อเคลือบฟิล์มบางของโลหะโมลิบดินัม และจะไม่กล่าวซ้ำอีกในรายละเอียด สำหรับเทคนิคการทดลองที่ได้เปลี่ยนแปลงไป คือ ขั้นตอนการวัดความหนาของฟิล์มบาง โดยได้เปลี่ยนจากการคำนวณโดยอาศัยการชั่งมวลของเนื้อฟิล์มซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูง เป็นการวัดโดยวิธีทางแสงที่เรียกว่า วิธีโทลานสกี (Tolansky method) [57,58] ซึ่งจะให้ความถูกต้องในการวัดสูงกว่า (ดูภาคผนวก ค) นอกจากนี้ในขั้นตอนการทำขั้วสัมผัสไฟฟ้าเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ได้เปลี่ยนจากการใช้กาวโลหะเงินเป็นการใช้โลหะอินเดียมชิ้นเล็กๆกดลงบนมุมของฟิล์มเนื่องจากพบว่ากาวเงินจะติดกับฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมไม่ดี ทำให้ได้ขั้วสัมผัสไฟฟ้าที่มีความต้านทานสูงและหลุดลอกง่ายในขณะทำการวัด

1. การสร้างเป้าของการสปัตเตอร์

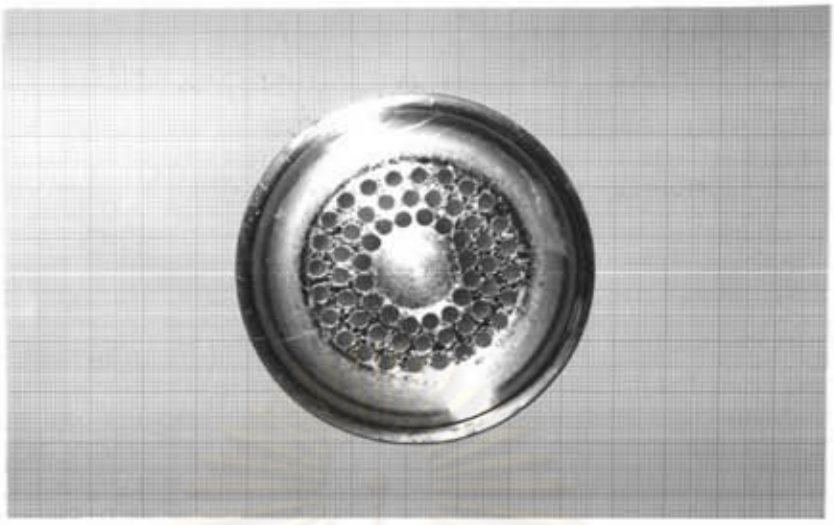
เป้าสำหรับการสปัตเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มมีทั้งหมด 4 อัน ประกอบด้วยเป้าทองแดง 1 อัน และเป้าทองแดงที่มีการฝังอินเดียมในบริเวณที่จะถูกสปัตเตอร์ (พื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์) ให้กระจายสม่ำเสมอด้วยอัตราส่วนของพื้นที่อินเดียมทั้งหมดต่อพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์ต่างๆกันอีก 3 อัน ซึ่งแต่ละอันจะมีอัตราส่วนของพื้นที่อินเดียมต่อพื้นที่ยังผลของการ

สปัตเตอร์เรียงตามลำดับ คือ 22 เปอร์เซนต์ 38 เปอร์เซนต์ และ 63 เปอร์เซนต์ เป้าแต่ละอันมีลักษณะดังรูปที่ 5.27ก รูปที่ 5.27ข รูปที่ 5.27ค และรูปที่ 5.27ง ตามลำดับ

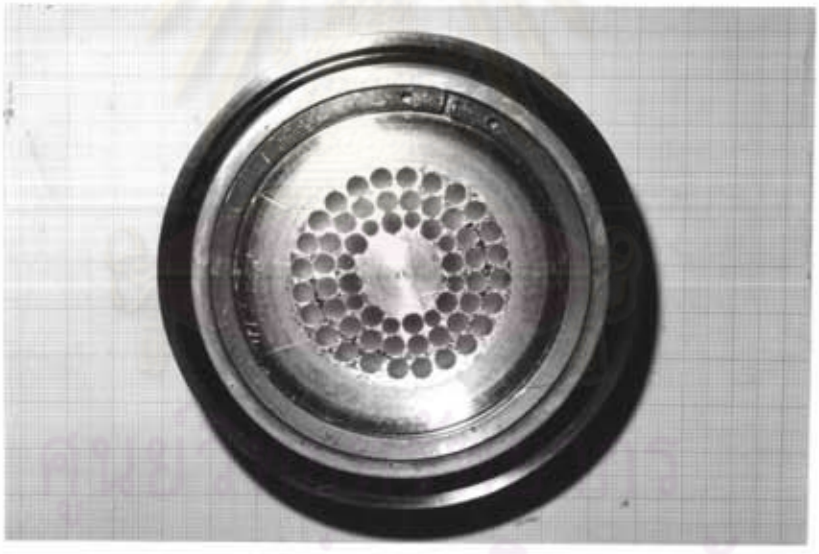


รูปที่ 5.27ก ภาพถ่ายของเป้าทองแดง (วงแหวนสีเข้มรอบจุดศูนย์กลางเป้า คือพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์)

รูปที่ 5.27ข ภาพถ่ายของเป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม 22 เปอร์เซนต์ บนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์



รูปที่ 5.27ค ภาพถ่ายของเป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม 38 เปอร์เซนต์ บนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์



รูปที่ 5.27ง ภาพถ่ายของเป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม 63 เปอร์เซนต์ บนพื้นที่ยังผล ของการสปัตเตอร์ (ขณะติดบนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์)

เป้าทองแดงทำด้วยทองแดงความบริสุทธิ์ต่ำ (ประมาณ 99 เปอร์ซนต์) เป็นแผ่นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนกลาง 7.2 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้ได้พอดีกับการติดบนแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3

เป้าทองแดงที่ฝังอินเดียมได้จากการนำแผ่นจานวงกลมทองแดงขนาดเท่ากันกับเป้าทองแดง ไปเจาะหลุมวงกลมให้กระจายอย่างสม่ำบนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์ซึ่งสังเกตุได้จากเป้าทองแดงที่ผ่านการสปัตเตอร์มาแล้ว ขนาดของพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์นี้จะเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกประมาณ 16 มิลลิเมตร และ 42 มิลลิเมตร ตามลำดับ(ดูรูปที่ 5.27ก ประกอบ) ซึ่งจะสอดคล้องกับบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวเป้ามีค่าสูงสุด(ดูรูปที่ 5.5ข ประกอบ) จำนวนหลุมที่เจาะบนแผ่นทองแดงแต่ละแผ่นมีทั้งสิ้น 60 หลุม แต่ละหลุมลึกประมาณ 2 มิลลิเมตร สำหรับเป้าที่มีเปอร์เซนต์ของพื้นที่อินเดียม 22 เปอร์เซนต์ และ 38 เปอร์เซนต์ จะได้จากการเจาะหลุมทั้งหมดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.3 มิลลิเมตร และ 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเป้าที่มีเปอร์เซนต์ของพื้นที่อินเดียม 63 เปอร์เซนต์ ได้จากการเจาะหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร จำนวน 8 หลุม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร จำนวน 52 หลุม แผ่นจานทองแดงที่เจาะหลุมและผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว จะนำไปอุดหลุมด้วยโลหะอินเดียมความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซนต์ ให้พอดีเต็มสำหรับแต่ละหลุม จากนั้นนำไปเผาภายใต้สุญญากาศขนาด 10^{-6} ทอรร์ เพื่อหลอมอินเดียมให้ติดแน่นกับทองแดง จากกระบวนการทั้งหมดนี้ จะได้เป้าที่พร้อมสำหรับใช้ในการสปัตเตอร์ตามต้องการ

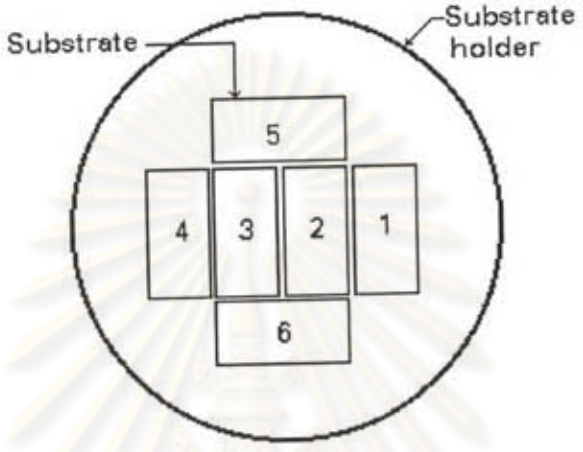
เป้าของการสปัตเตอร์แต่ละอันจะติดกับแท่นยึดเป้าของแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์โดยมีครีมโลหะเงินทาที่ด้านหลัง เพื่อช่วยในนำความร้อนขึ้นไปยังแผ่นระบายความร้อนซึ่งอยู่นอกระบบสุญญากาศ

2. สภาวะของการเคลือบฟิล์ม

ฟิล์มบางที่เคลือบจากการสปัตเตอร์เป้าแต่ละอันจะกระทำภายใต้สภาวะของการดิสชาร์จเดียวกัน คือ ที่ความดันกาซอาร์กอนประมาณ 15 มิลลิทอรร์ ความต่างศักย์ประมาณ 440 โวลท์ และกระแส 50 มิลลิแอมแปร์ สภาวะต่างๆเหล่านี้ เฉพาะกระแสของการดิสชาร์จเท่านั้นที่จะคงที่ตลอดเวลาที่เคลือบฟิล์ม(เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 2 มิลลิแอมแปร์) โดยการทำงานที่ดีของวงจรจำกัดกระแส ส่วนความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะพบการเปลี่ยนแปลงในระดับขนาด 20 โวลท์ ตามการเปลี่ยนแปลงของความดันกาซอาร์กอน(ประมาณ 2 มิลลิทอรร์) ซึ่งมีสาเหตุจากขีดจำกัดของความสามารถของอุปกรณ์ควบคุมอัตราไหลของกาซและไม่สามารถควบคุมได้ การรักษาระดับของความต่างศักย์ให้คงที่(เมื่อสังเกตุเห็นการเปลี่ยนแปลง) สามารถกระทำได้โดยการ

ปรับความเข้มสนามแม่เหล็กเพื่อชดเชยผลจากการเปลี่ยนแปลงความดัน

วัสดุรองรับของการเคลือบฟิล์มในแต่ละชุดมีทั้งหมด 6 ชิ้น วางบนแท่นวางวัสดุรองรับในตำแหน่งต่างๆรอบจุดศูนย์กลางของวัสดุรองรับ แสดงดังรูปที่ 5.28 สำหรับอุณภูมิของแท่นวางวัสดุรองรับขณะเคลือบฟิล์มมีค่าคงที่เท่ากับ 100 ^{o}C สำหรับการเคลือบฟิล์มทุกชุด



รูปที่ 5.28 ภาพวาดแสดงการวางวัสดุรองรับเมื่อมองจากด้านบน

3. ผลการทดลอง

3.1 ความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์ม

ความหนาหนาและอัตราเคลือบฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอร์เป้าแต่ละอันได้ผลแสดงดังตารางที่ 5.7 ซึ่งฟิล์มที่นำไปวิเคราะห์ความหนาเป็นฟิล์มบนวัสดุรองรับที่วางในตำแหน่งที่ 2, 4 และ 5 ตามรูปที่ 5.29

จากตารางแสดงความหนาจะสามารถหาได้ว่าความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์แบบที่ 3 บนระนาบที่ห่างจากเป้าของการสปัตเตอร์ 5 เซนติเมตร จะลดลงประมาณ 20 เปอร์เซนต์ เมื่อเลื่อนจากตำแหน่งตรงจุดศูนย์กลางเป้าไปตามแนวรัศมีเป็นระยะ 2.5 เซนติเมตร ถ้าเปรียบเทียบระหว่างเป้าแต่ละอันแล้วจะเห็นว่าอัตราการเคลือบฟิล์มไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อพื้นที่ของอินเดียมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.7 ความหนาและอัตราเคลือบฟิล์ม

เป้า	ชื่อตัวอย่าง	ความหนา (อังสตรอม)	อัตราเคลือบ (อังสตรอมต่อนาที)
ทองแดง	HM:Cu-A2	8,861	443
	HM:Cu-A4	6,947	347
	HM:Cu-A5	6,561	328
ทองแดง ที่ฝังอินเดียม 22 เปอร์เซนต์	HM:CI-I2	12,271	409
	HM:CI-I4	7,896	263
	HM:CI-I5	9,762	325
ทองแดง ที่ฝังอินเดียม 38 เปอร์เซนต์	HM:CI-E2	10,861	362
	HM:CI-E4	8,164	272
	HM:CI-E5	9,731	324
ทองแดง ที่ฝังอินเดียม 63 เปอร์เซนต์	HM:CI-G2	10,774	359
	HM:CI-G4	8,264	276
	HM:CI-G5	7,728	258

หมายเหตุ : 1. ตัวเลขที่ท้ายชื่อตัวอย่างจะระบุถึงตำแหน่งของการวางวัสดุรองรับ

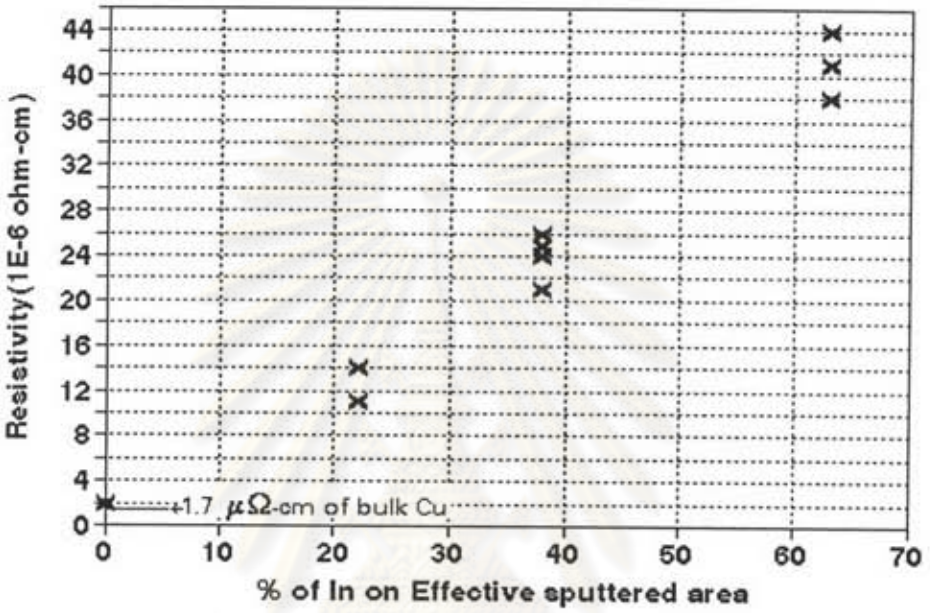
2. ความคลาดเคลื่อนในการวัดความหนามีค่าประมาณ 5 เปอร์เซนต์ของค่าความหนาที่แสดง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ลักษณะผิวหน้าและสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางที่ได้ทั้งหมดเมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่า พบว่ามีผิวเรียบ สะท้อนแสงดี โดยสีของฟิล์มจะเปลี่ยนจากสีทองแดงไปเป็นสีเงินมากขึ้น เมื่อพื้นที่ของอินเดียมบนเป้ามากขึ้น

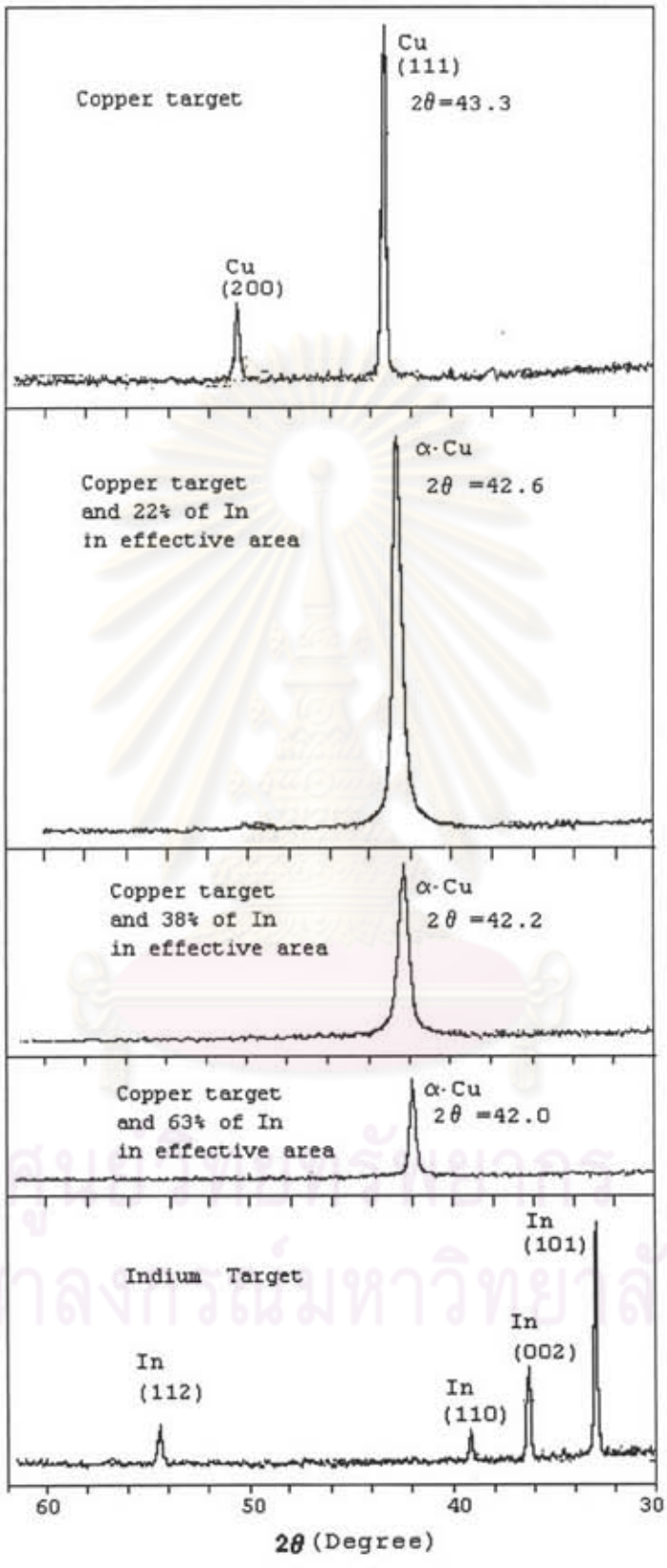
สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ได้จะเพิ่มตามเปอร์เซนต์ของพื้นที่ของอินเดียมบนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์เป้า แสดงดังกราฟในรูปที่ 5.29 ซึ่งถือว่าฟิล์มจากเป้าทองแดงที่ไม่มีอินเดียมเป็นกรณีที่เปอร์เซนต์ของพื้นที่อินเดียมเป็นศูนย์ จะสังเกตุเห็นว่าในกรณีของฟิล์มบางของทองแดงนั้นสภาพต้านทานที่ได้ใกล้เคียงกับทองแดงแบบ Bulk มาก



รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มกับพื้นที่อินเดียมบนเป้า

3.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้ แสดงดังรูปที่ 5.30ก รูปที่ 5.30ข รูปที่ 5.30ค และรูปที่ 5.30ง โดยเรียงตามลำดับของฟิล์มจากเป้าที่ไม่มีอินเดียม (เป้าทองแดง)จนถึงเป้าที่มีพื้นที่ของอินเดียม 63 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้เพื่อที่จะให้การวิเคราะห์ผลการเตรียมฟิล์มที่ได้เหล่านี้มีความชัดเจน ในรูปที่ 5.30จ ได้แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางของโลหะอินเดียมบริสุทธิ์ที่เตรียมได้จากเป้าอินเดียมบริสุทธิ์ไว้ด้วย ซึ่งฟิล์มบางของโลหะอินเดียมนี้เตรียมในระบบสปัตเตอริงโมเดล BAE 250 T ของบริษัท Balzer ในห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Physics Research Laboratory : SPRL) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางจากเป้าแบบต่างๆ

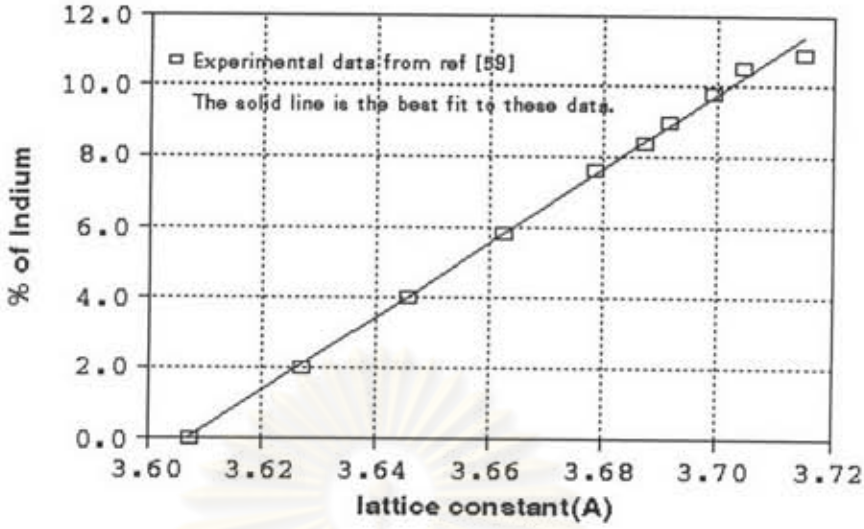
4. การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้จากเป้าทองแดงตามรูปที่ 5.30ก เป็นลักษณะทั่วไปของฟิล์มบางของทองแดงแบบผลึกพหุ (polycrystalline) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Simple cubic และมีค่าคงที่ของผลึกระหว่าง 3.6074 - 3.6150 อังสตรอม

เมื่อมีอินเดียมผสมในเนื้อฟิล์ม รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้จะเปลี่ยนไปเป็นดังรูปที่ 5.30ข รูปที่ 5.30ค และรูปที่ 5.30ง ซึ่งจะปรากฏชัดเจนเพียงยอดเดียว ที่เลื่อนออกไปเล็กน้อยจากตำแหน่งของยอดการเลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ในรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้จากเป้าทองแดง โดยการเลื่อนตำแหน่งของยอดการเลี้ยวเบนนี้ จะไปทางด้านที่มุมการเลี้ยวเบนลดลง(ค่าคงที่ของผลึกเพิ่มขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางของโลหะอินเดียมในรูปที่ 5.30จ จะเห็นว่ายอดของการเลี้ยวเบนเหล่านี้ไม่ได้มาจากโครงสร้างของอินเดียม ดังนั้น รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้จากเป้าของทองแดงซึ่งฝังอินเดียม ควรจะมาจากโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันกับทองแดงที่มีค่าคงที่ของผลึกเพิ่มขึ้น และยอดของการเลี้ยวที่เห็นยังเป็นยอดการเลี้ยวเบนจากระนาบ (111) แต่ได้เลื่อนตำแหน่งเนื่องจากค่าคงที่ของผลึกที่เปลี่ยนไป นั่นคือ ฟิล์มบางของโลหะผสมที่ได้เป็นเฟสอัลฟาของทองแดง ซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่างทองแดงกับอินเดียมในลักษณะที่เป็นการละลายของอินเดียมในทองแดง โดยอะตอมอินเดียมจะไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมทองแดงในโครงร่างผลึกเดิม และทำให้ค่าคงที่ผลึกของสารผสมที่ได้เพิ่มขึ้น

สำหรับการผสมกันระหว่างทองแดงกับอินเดียม แล้วได้โครงสร้างในเฟสอัลฟาของทองแดง จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณอะตอมของอินเดียมที่เป็นตัวถูกละลายสูงไม่เกิน 11 เปอร์เซนต์ของอะตอมทองแดง โดยการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ของผลึกของสารผสมที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.31 [59]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ผลึกของทองแดงกับเปอร์เซนต์ของอะตอมอินเดียมที่เป็นตัวถูกละลาย

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้จากเป้าทองแดงซึ่งฝังอินเดียมแต่ละอัตราส่วน นำไปคำนวณหาค่าคงที่ผลึกได้ผลดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าคงที่ของผลึกที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 5.30ข รูปที่ 5.30ค และรูปที่ 5.30ง

รูปที่	เปอร์เซนต์ของพื้นที่อินเดียม	ค่าคงที่ของผลึก (อังสตรอม)
5.30ข	22	3.6725
5.30ค	38	3.7056
5.30ง	63	3.7258

จากค่าคงที่ของผลึกที่คำนวณได้นี้ และใช้ข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึกทองแดงกับปริมาณอินเดียมที่ละลายในทองแดงซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.31 จะสามารถหาเปอร์เซนต์ของจำนวนอะตอมของอินเดียมในเนื้อฟิล์มบางที่ได้จากการสปัตเตอร์เป้าทองแดงที่ฝังอินเดียม และแสดงเปรียบเทียบกับเปอร์เซนต์ของพื้นที่อินเดียมบนเป้าได้ดังตารางที่ 5.9 สำหรับ

เปอร์เซนต์ของอินเดียมในฟิล์มบางที่ได้จากเป้าที่ฝังอินเดียม 63 เปอร์เซนต์ ได้จากการประมาณว่าการเพิ่มแบบเชิงเส้นของค่าคงที่ของผลึกตามรูปที่ 5.31 ยังเป็นไปได้เมื่อเปอร์เซนต์ของอินเดียมสูงกว่า 11 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 5.9 เปอร์เซนต์ของอินเดียมในเนื้อฟิล์มที่ได้จาก
เป้าที่ฝังอินเดียมทั้งสามอัตราส่วน

เปอร์เซนต์ของ พื้นที่อินเดียม	เปอร์เซนต์ของ อินเดียมในฟิล์ม
22	6.9
38	10.4
63	12.5

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของอินเดียมในฟิล์มบางที่ได้จากการสปัตเตอร์เป้าทองแดงที่ฝังอินเดียมในตารางที่ 5.9 ชี้ให้เห็นว่าอัตราการสปัตเตอร์อินเดียมที่ฝังบนทองแดงจะน้อยกว่าอัตราการสปัตเตอร์ทองแดงมาก การที่จะได้ฟิล์มบางโลหะผสมที่มีปริมาณของอะตอมอินเดียมต่ออะตอมของทองแดงสูงถึงระดับ 1:1 นั้น จึงไม่น่าจะเป็นไปได้ด้วยการสปัตเตอร์เป้าโครงสร้างแบบนี้

5. สรุปผลการทดลอง

การเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมโดยการสปัตเตอร์เป้าทองแดงที่มีอินเดียมฝังอยู่ในบริเวณพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์ สามารถที่จะได้ฟิล์มบางของโลหะผสมซึ่งอยู่ในรูปเฟสอัลฟาของทองแดง ซึ่งมีปริมาณของอินเดียมในเนื้อฟิล์มประมาณ 6.9 , 10.4, และ 12.5 เปอร์เซนต์ของจำนวนอะตอมทองแดง เมื่อพื้นที่ของอินเดียมบนพื้นที่ยังผลของการสปัตเตอร์ประมาณ 22, 38, และ 63 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

สำหรับวัตถุประสงค์อีกอย่างหนึ่งของงานวิจัยนี้ คือ จะนำฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมที่ได้ไปเข้ากระบวนการซิลิไนเซชัน เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มบางของสารประกอบคอปเปอร์อินเดียมไดซิลิไนด์ ($CuInSe_2$) ซึ่งในกระบวนการนี้ต้องการสารตั้งต้นที่มีอัตรา

ส่วนของอะตอมอินเดียมต่ออะตอมทองแดงระหว่าง 0.9 - 1 แต่จากการวิเคราะห์ข้างต้นได้เห็นว่า อัตราส่วนของอินเดียมต่อทองแดงในฟิล์มโลหะผสมที่ได้ยังน้อยมาก ดังนั้น แนวทางการเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอินเดียมตามวิธีที่ปฏิบัติในงานวิจัยนี้ จึงไม่น่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารตั้งต้นของกระบวนการซิลิไนเซชัน เพื่อเตรียมฟิล์มบางคอบเปอร์อินเดียมไดซิลิไนด์

อย่างไรก็ตาม ผลสรุปนี้ได้มาจากการวิเคราะห์ปริมาณของอินเดียมในเนื้อฟิล์มโดยพิจารณาจากโครงสร้างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มเท่านั้น เพื่อที่จะยืนยันผลที่ได้นี้ควรที่จะมีการวิเคราะห์ปริมาณอินเดียมในเนื้อฟิล์มโดยเทคนิคอื่นที่แม่นยำมากกว่า เช่น การวิเคราะห์โดยวิธี Energy Dispersive X-ray Analysis(EDXS) หรือ การวิเคราะห์โดยวิธี X--ray Fluorascence(XRF) แต่เนื่องด้วยข้อขัดข้องในการจัดหาเครื่องมือวิเคราะห์ระหว่างช่วงเวลาที่ทำวิจัย จึงไม่สามารถดำเนินงานในส่วนนี้ได้

นอกจากการเตรียมฟิล์มบางของโลหะผสมทองแดงกับอินเดียมซึ่งได้ผลสรุปดังกล่าวแล้ว ในส่วนของการเตรียมฟิล์มของทองแดงนั้นถือปืนผลพลอยได้นอกเหนือวัตถุประสงค์ของการวิจัยในหัวข้อนี้ ซึ่งจากขนาดของสภาพต้านทานและโครงสร้างการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางทองแดงที่ได้ แสดงว่า ระบบการเคลือบฟิล์มบางที่สร้างขึ้นสามารถเคลือบฟิล์มบางของโลหะทองแดงซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับทองแดงแบบ Bulk มาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย