

บทที่ 4

ขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผลการทดลองของการสับตัดเทอร์ริงตามเงื่อนไขที่ใช้จากการใช้หัวแมกนิตรอนและระบบดีซีแมกนิตรอนที่สร้างขึ้นจะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของการดีสชาร์จจากหัวแมกนิตรอน การวิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมา โดยการใช้หัววัดกลางมัวร์ และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่ได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และวิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 การสับตัดเทอร์ริง

ในทุกครั้งที่ทำการสับตัดเทอร์ริงจะดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1.1 ขั้นตอนก่อนการสับตัดเทอร์ริง

ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด ทำความสะอาดหัวแมกนิตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนิตรอนและกราวชิลด์ และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้ ติดตั้งเป่าที่หัวแมกนิตรอนและนำหัวแมกนิตรอนไปติดตั้งที่ด้านบนของภาชนะสุญญากาศ ปรับแทนวางแผ่นรองรับให้ห่างจากเป่าตามระยะห่างที่ต้องการ และตรวจสอบทุกระบบที่ใช้ในการสับตัดเทอร์ริง

เตรียมแผ่นรองรับ โดยแผ่นรองรับที่ใช้ในการสับตัดเทอร์ริง คือ กระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์ นำไปตัดให้มีขนาดตามต้องการ และนำไปทำความสะอาดด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
- ทำความสะอาดด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 5 นาที
- ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 5 นาที
- ทำความสะอาดด้วยเอทานอล ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 5 นาที

- ทำความสะอาดด้วยน้ำป้อนดัดประจุในเครื่องอูลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ชั่งมวลของกระจกสไลด์ แล้วนำไปใส่ไว้บนแท่นวางแผ่นรองรับ

4.1.2 ขั้นตอนการสับตัดเทอริงเคลือบฟิล์มบาง

- เปิดปั๊มกลโรตารี และเปิดวาล์วหยาบสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์
- เปิดน้ำระบายความร้อนให้กับปั๊มไอฟุ้งกระจาย จ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อทำการต้มน้ำมัน
- ปิดวาล์วหยาบ เปิดวาล์วหลังเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางปั๊มไอฟุ้งกระจาย
- เมื่อขดลวดความร้อนเริ่มร้อน เติมนิโตรเจนเหลวที่ช่องทางเติมภายในตัวดักไอน้ำมัน เพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำมันหลุดลอดเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ
- เปิดปลั๊กวาล์วเพื่อสูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศด้วยการทำงานร่วมกันของของปั๊มไอฟุ้งกระจายและปั๊มกลโรตารี
- เมื่อความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ ป้อนก๊าซอาร์กอนผ่านทางเครื่องควบคุมการไหลของก๊าซโดยมวล โดยควบคุมให้อัตราการไหลของก๊าซคงที่อย่างต่อเนื่องในปริมาณที่ต้องการ และเปิดวาล์วเพื่อปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ปรับวาล์วเข็มเพื่อควบคุมปริมาณการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$ ทอร์
- เปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับระบบโดยมีค่า 350-500 โวลท์ และสังเกตการโกลว์ดิสชาร์จที่เกิดขึ้น
- เมื่อเกิดการโกลว์ดิสชาร์จขึ้น ปรับวาล์วหลังให้อัตราการปั๊มสัมพันธ์กับอัตราการไหลของก๊าซ เพื่อให้ความดันภายในภาชนะสุญญากาศขณะป้อนก๊าซอาร์กอนมีค่าคงที่
- เมื่อควบคุมเงื่อนไขได้ตามต้องการแล้วทำการสับตัดเทอริงเป็นเวลาตามต้องการ

- เมื่อทำการสับตัดเทอร์ริงครบตามเวลาที่ต้องการ ปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ปิดระบบการป้องกันก๊าซ หยุดการจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย ปิดปลั๊กวาล์ว ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ นำที่วางแผ่นรองรับพร้อมแผ่นรองรับออกจากภาชนะสุญญากาศผ่านทางช่องทางใส่แผ่นรองรับ ชั่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ และปิดปั๊มกลโรตารี หลังจากขดลวดความร้อนเย็นลง

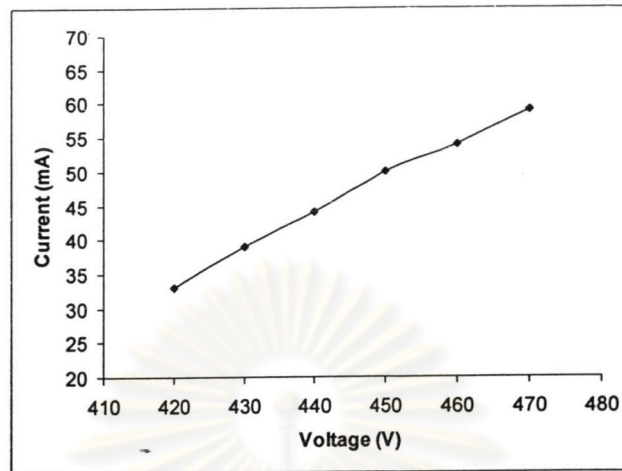
4.1.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการสับตัดเทอร์ริง

ในเงื่อนไขของการสับตัดเทอร์ริง เป้าเงินถูกนำมาใช้ในการสับตัดเทอร์ริง ทั้งนี้เนื่องจากว่าเงินเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนดีที่สุด [38] และยังเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงที่ดี [38] และจากการทดลองสับตัดเทอร์ริงที่ระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับด้วยระยะห่างต่างๆกัน พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับมากกว่า 10 เซนติเมตรฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับจะมีความสม่ำเสมอและเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับมากขึ้นจะทำให้อัตราการเคลือบของฟิล์มมีค่าลดลง ดังนั้นในการทดลองจึงทำการสับตัดเทอร์ริงที่ระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับ 11 เซนติเมตร นอกจากนี้จากการทดลองการสับตัดเทอร์ริง พบว่าความดันของก๊าซอาร์กอนที่สามารถทำให้การสับตัดเทอร์ริงยังรักษาสภาพอยู่ได้อย่างต่อเนื่องมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 1×10^{-3} ทอร์ ดังนั้นจึงทำการสับตัดเทอร์ริงในความดันของก๊าซอาร์กอนที่ประมาณ $2 - 3 \times 10^{-3}$ ทอร์ โดยการสับตัดเทอร์ริงได้ใช้ตามเงื่อนไขในตารางการทดลองที่ 4.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการสับตัดเทอร์ริง

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
เป้าที่ใช้	เงิน
แผ่นรองรับ	กระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์
ระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับ	11 เซนติเมตร
ความดันพื้นฐาน	$1 - 3 \times 10^{-5}$ ทอร์
ปริมาณก๊าซอาร์กอน	2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
ความดันขณะทำการสับตัดเทอร์ริง	$2 - 3 \times 10^{-3}$ ทอร์
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ	30 นาที
ปรับค่าความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ	420-470 โวลต์

4.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของหัวแมกนิตรอน

จากกราฟแสดงค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการดิสชาร์จในช่วง 420-470 โวลต์กับค่ากระแสของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในช่วง 30-60 มิลลิแอมป์ที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 4.1 โดยกระแสของการดิสชาร์จที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของกระแสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเริ่มการสับเทอริงจนกระทั่งหยุดการสับเทอริง โดยความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่ใช้ในการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก และปริมาณของก๊าซอาร์กอนซึ่งมีปริมาณน้อยซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในระหว่างการทดลอง จึงเป็นผลให้จำนวนและพลังงานของอิเล็กตรอนและไอออนของอาร์กอนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นค่ากระแสของการดิสชาร์จโดยเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และจากความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับกระแสของการดิสชาร์จที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำไปหาค่าความสามารถในการกักเก็บอิเล็กตรอนตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.18) จะมีค่าประมาณ 5.82

จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ของการดิสชาร์จและกระแสของการดิสชาร์จ เมื่อนำมาคำนวณเป็นกำลังที่ใช้ในการสับเทอริงก็จะได้อ้างอิงแสดงในตารางที่ 4.2

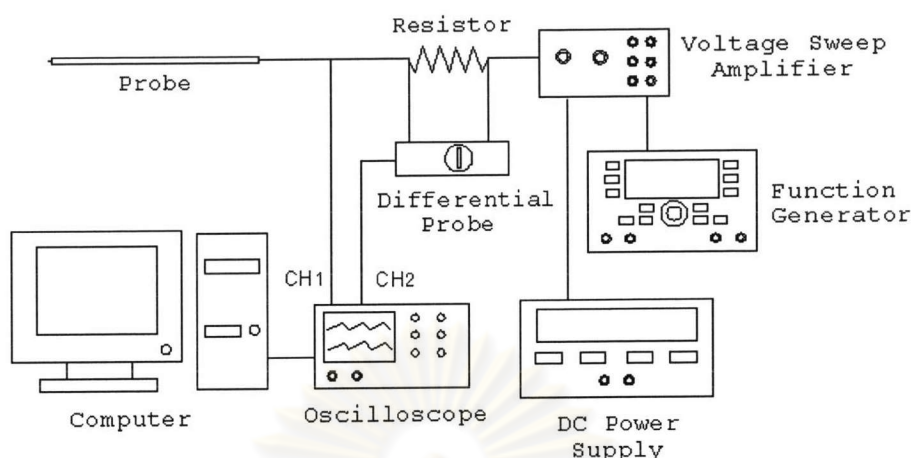
ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของการสับตเทอริงที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของการดิซชาร์จและความต่างศักย์ของการดิซชาร์จภายใต้เงื่อนไขของการสับตเทอริงในตารางที่ 4.1

	กระแสดิซชาร์จ (มิลลิแอมป์)	ความต่างศักย์ดิซชาร์จ (โวลต์)	กำลังการสับตเทอริง (วัตต์)
Ag1	33	420	13.86
Ag2	39	430	16.77
Ag3	44	440	19.36
Ag4	50	450	22.50
Ag5	54	460	24.84
Ag6	59	470	27.73

จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังของการสับตเทอริงมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 13.86-27.73 วัตต์ และจะใช้สัญลักษณ์แทนโดย Ag1-Ag6

4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมา

วิธีหัววัดเดี่ยวกลางมัวร์แบบกวาดเป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาที่เกิดจากระบบดีซีแมกเนตรอนสับตเทอริงที่สร้างขึ้น โดยหัววัดที่ใช้ทำมาจากโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร และมีความยาวประมาณ 30 มิลลิเมตร อยู่ในท่อแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร ยกเว้นในบริเวณปลายหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา โดยจะใช้หัววัดสอดเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ในทิศทางที่ขนานกับผิวเป้า ด้วยระยะห่างจากผิวเป้าประมาณ 5 เซนติเมตร และปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดจะถูกไบแอสด้วยความต่างศักย์ในลักษณะต่อเนื่องด้วยสัญญาณรูปฟันปลา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่ได้เมื่อหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยการบันทึกสัญญาณผ่านทางออสซิลอโคป โดยได้แสดงแผนภาพของระบบหัววัดเดี่ยวกลางมัวร์แบบกวาดไว้ดังรูปที่ 4.2

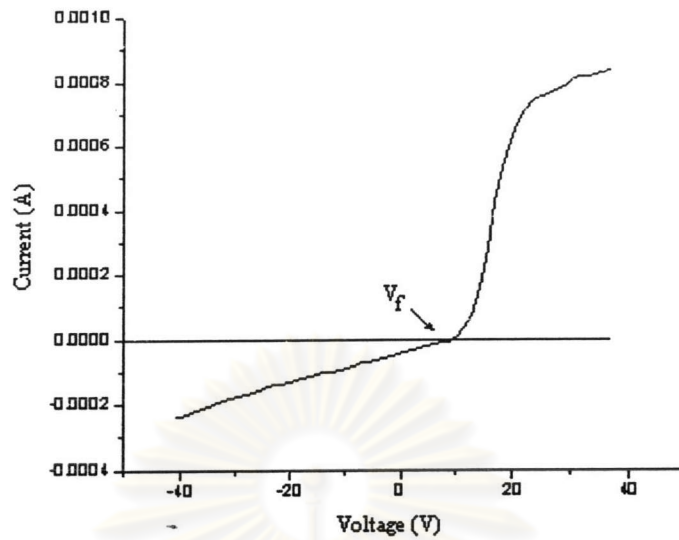


รูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาด้วยวิธีหัววัดเดี่ยวลงมัวร์แบบกวาด

ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัด ทำได้โดยการจ่ายความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง MODEL: GPR-30H10D และสัญญาณรูปฟันปลาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ (function generator) ยี่ห้อ metrix รุ่น mtx3240 ให้กับวงจรขยายสัญญาณที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นมา ส่งผ่านไปยังหัววัด และบันทึกลักษณะสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Textronix รุ่น TDS220 โดย CH1 จะต่อคร่อมตัวต้านทาน $500\ \Omega$ เพื่อนำไปหาค่ากระแสจากความต่างศักย์ที่ได้ โดย CH2 เป็นความต่างศักย์โดยตรง แล้วทำการดึงสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์โดยโปรแกรม wave star เมื่อได้ข้อมูลที่เป็นตัวเลขของสัญญาณออกมาก็จะใช้โปรแกรม origin และ excel ในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรของพลาสมาที่ได้จากระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

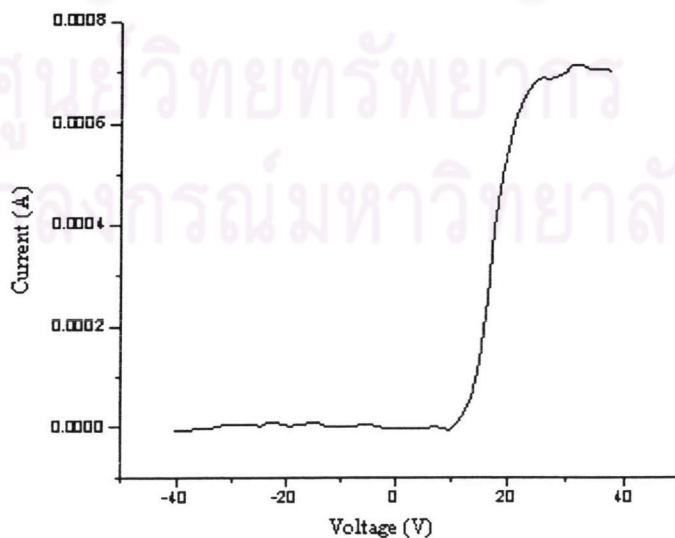
4.3.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรของพลาสมา

แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรของพลาสมาจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดเดี่ยวลงมัวร์แบบกวาด ตามเงื่อนไขของการสปัตเตอร์ริงข้างต้น ที่ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ 420 โวลต์ และกระแสของการดิสชาร์จ 34 มิลลิแอมป์ โดยความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัด 280 โวลต์ ลักษณะสัญญาณรูปฟันปลา ตำแหน่งของหัววัดขนานกับสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเป้า อยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนกับแท่นวางแผ่นรองรับ ห่างจากผิวเป้าประมาณ 5 เซนติเมตร



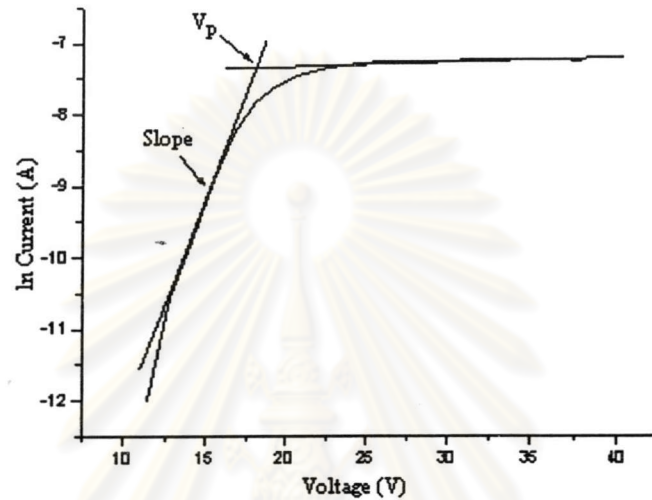
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะสัญญาณที่ได้จากหัววัดเดียวแสงมัลติแบบกวาด

จากสัญญาณที่ได้เป็นค่าที่ได้จากกระแสโดยรวมระหว่างกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออน โดยบริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิมพัลส์จะอยู่ในบริเวณที่ศักย์มีค่าเป็นบวกที่มากกว่า 20 โวลต์ และบริเวณกระแสไอออนอิมพัลส์คือบริเวณที่ศักย์มีค่าเป็นลบ โดยกระแสไอออนจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตามศักย์ที่เป็นลบเพิ่มขึ้น และสามารถหากระแสอิเล็กตรอนได้โดยการตัดกระแสไอออนในบริเวณที่ศักย์เป็นลบออกไป โดยการหาสมการเส้นตรงแทนค่ากระแสไอออนแล้วลบออกจากกระแสรวม และจากสัญญาณที่ได้จะได้ค่าความต่างศักย์ลอยมีค่า 7.11 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่กระแสรวมระหว่างกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะกระแสเมื่อตัดกระแสไอออนออกไปและความต่างศักย์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับกระแสเมื่อตัดกระแสไอออนออกไป โดยจะสามารถวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้โดยใส่ลอการิทึมให้กับกระแส และหาความชันในช่วงทรานสิชันของค่าลอการิทึมของกระแสกับความต่างศักย์ ซึ่งก็คือส่วนกลับของอุณหภูมิอิเล็กตรอน ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.22)



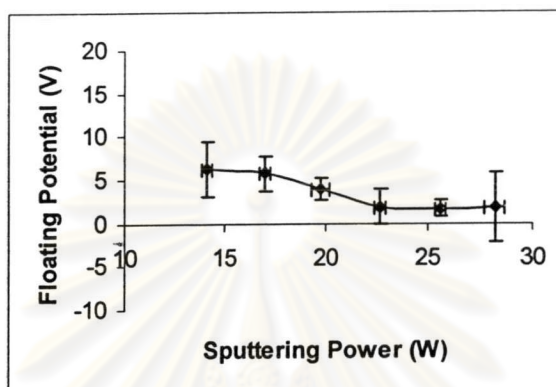
รูปที่ 4.5 แสดงลอการิทึมของกระแสและความต่างศักย์

เมื่อหาความชันในช่วงทรานสิชันของลอการิทึมของกระแสกับความต่างศักย์จะหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้จากส่วนกลับของความชันดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.22) ซึ่งจากตัวอย่างนี้มีค่า 2.24 อิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่า 25,984 เคลวิน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่อธิบายพลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมา และค่าศักย์พลาสมาที่ได้มีค่า 18.08 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ตำแหน่งของศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมา โดยกระแสที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสของอิเล็กตรอนเป็นส่วนใหญ่เพราะอิเล็กตรอนมีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่สูงกว่าไอออนของอาร์กอน โดยศักย์ของพลาสมาเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสำคัญในการพิจารณาคุณสมบัติของฟิล์มที่เคลือบ และเมื่อทราบค่าศักย์ของพลาสมาและศักย์ลอยสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้อีกวิธีจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.26) โดยค่าอุณหภูมิที่ได้มีค่า 2.04 อิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่า 23,664 เคลวิน

และสามารถหาความหนาแน่นของพลาสมาจากค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและค่ากระแสไอออนที่ความต่างศักย์เป็นลบมากๆ โดยใช้ที่ -40 โวลต์ ซึ่งมีค่ากระแส 2.4×10^{-4} แอมป์ และพื้นที่ของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมามีค่า 4.28×10^{-6} ตารางเมตร จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.27) จะได้ความหนาแน่นจากตัวอย่างมีค่า 2.35×10^{17} อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อ

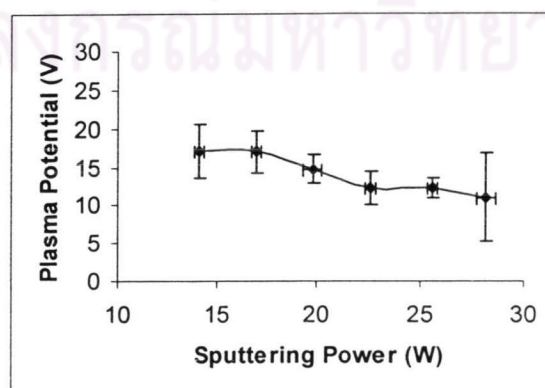
ใช้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากวิธีแรก และ 2.61×10^{17} อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากวิธีที่สอง และจากค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมาที่ได้ สามารถคำนวณค่าความหนาของบริเวณมืดได้ ดังแสดงในภาคผนวก (ซ)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมา



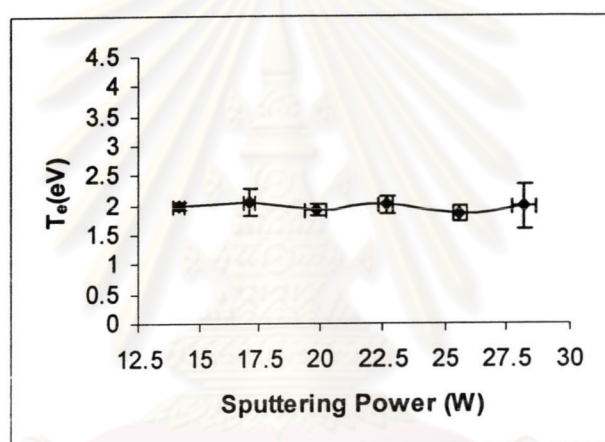
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับศักย์ลอย

จากรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสับตัดเทอริงกับศักย์ลอยที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณจากหัววัดลงมัวร์ โดยค่าศักย์ลอยจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-7 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่กระแสที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์ และจากผลการทดลองค่าของศักย์ลอยจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งน่าจะเป็นเพราะในระหว่างการทดลองมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ตลอดการทดลอง อาทิเช่น ความดันของก๊าซอาร์กอน กระแสของการดีสชาร์จ รวมไปถึงการเก็บสัญญาณที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่ได้จากหัววัด ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจากการทดลอง



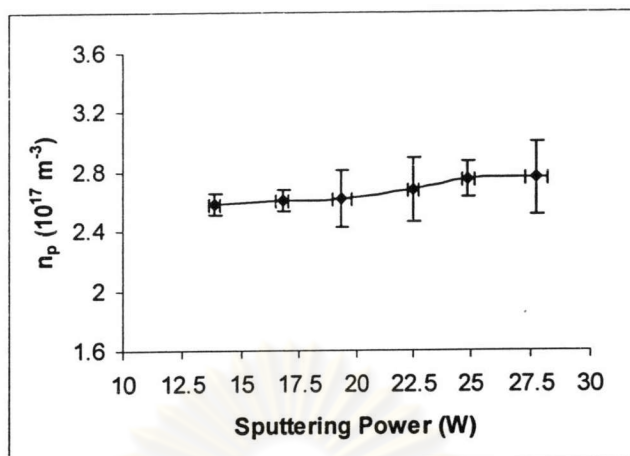
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับศักย์ของพลาสมา

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสเปตเทอริงในช่วง 13-29 วัตต์ กับค่าศักย์ของพลาสมาที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณจากหัววัดลงมัวร์ โดยค่าศักย์ของพลาสมาจะมีค่าอยู่ในช่วง 11-18 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าที่ศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสเปตเทอริง และค่าของศักย์พลาสมามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งน่าจะเป็นเพราะพารามิเตอร์ในการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดลอง โดยค่าศักย์ของพลาสมาที่ได้นั้น หัววัดลงมัวร์อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากแผ่นรองรับประมาณ 6 เซนติเมตร จึงไม่อาจสรุปได้อย่างแน่ชัดถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไอออนในการพิจารณาคุณสมบัติของฟิล์มที่เคลือบ และได้ใช้ค่าศักย์ของพลาสมาและศักย์ลอยคำนวณหาค่าของอุณหภูมิของอิเล็กตรอนจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.6) ซึ่งแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสเปตเทอริงในช่วง 13-29 วัตต์ กับค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณจากหัววัดเดี่ยวลงมัวร์แบบกวาด โดยเป็นการหาค่าจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.26) โดยค่าของอุณหภูมิอิเล็กตรอนจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะมีค่า 20,880-24,360 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีแนวโน้มที่จะคงที่ ซึ่งเป็นเพราะพลังงานโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจากกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง และผลจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของพารามิเตอร์ตัวอื่นในระหว่างการทดลองและได้ใช้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่ได้คำนวณหาความหนาแน่นของพลาสมาจากความสัมพันธ์ในสมการ (2.27) ซึ่งแสดงผลที่ได้ในรูปที่ 4.9

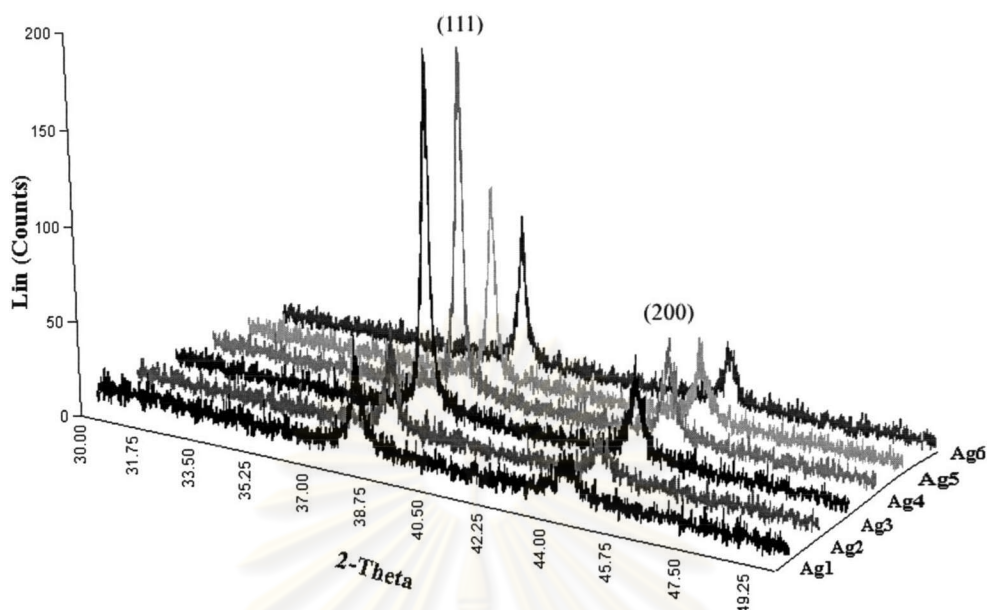


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความหนาแน่นของพลาสมา

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสเปคโตรริงในช่วง 13-29 วัตต์ กับค่าความหนาแน่นของพลาสมาที่ได้จากหัววัดเดี่ยวกลางมัวร์แบบกวาด โดยการหาค่าจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.27) โดยใช้ค่ากระแสไอออนอิมิตซ์ที่มีความต่างศักย์ -40 โวลต์ และพื้นที่ของหัววัดที่ใช้มีค่า 4.28×10^{-6} ตารางเมตร ค่าความหนาแน่นของพลาสมาจะมีค่าอยู่ในช่วง $2.5-2.8 \times 10^{17}$ อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร โดยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง ซึ่งเป็นผลให้การแตกตัวเป็นไอออนของอาร์กอนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการทดลอง

4.4 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเงิน ดังนั้นจึงได้นำเอาฟิล์มบางเงินที่เตรียมได้ตามเงื่อนไขไปศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาลักษณะและตำแหน่งของพีคที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานเพื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเงิน จากรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ ตั้งแต่ $30^\circ - 50^\circ$ ของฟิล์มบางเงินที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีดีซี แมกนิตรอนสเปคโตรริงตามเงื่อนไขข้างต้นที่กำลังไฟฟ้าต่างกันตั้งแต่ 13.86-27.73 วัตต์ (Ag1-Ag6)



รูปที่ 4.10 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเงินที่กำลังไฟฟ้าต่างกันตั้งแต่ 13.86-27.73 วัตต์ (Ag1-Ag6)

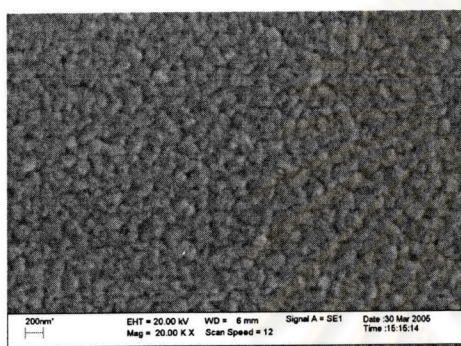
ปรากฏว่าฟิล์มบางเงินที่เคลือบบนกระจกสไลด์มีความเป็นผลึกที่ดีสังเกตได้จากลักษณะของพีคที่มีความคมชัด โดยฟิล์มบางของเงินมีลักษณะเป็นผลึกพหุพันธ์ ประกอบด้วยผลึกที่มีหลายเกรนที่มีเนื้อสาร (crystallographic texture) [39] โดยโครงสร้างผลึกที่สังเกตได้จะปรากฏระนาบ (111) ของตำแหน่งพีคที่มุม 2θ ประมาณ 38.10° [39] ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุด โดยโครงสร้างของผลึกจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางนี้มากที่สุด และจะปรากฏระนาบ (200) ของตำแหน่งพีคที่มุม 42.28° [39] ซึ่งตำแหน่งของพีคที่ปรากฏสอดคล้องกับงานวิจัยของจังหวัดศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆในการเคลือบฟิล์มบางของเงินโดยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปัตเทอริง อาทิ ความดัน อุณหภูมิของแผ่นรองรับ และกำลังของการสปัตเทอริงที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของฟิล์มบางเงิน [39] และเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพีคกับไฟล์มาตรฐานดังแสดงไว้ในภาคผนวก (ก) จะพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบคือฟิล์มบางของเงินที่มีลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก [39] ดังแสดงในภาคผนวก (ข)

4.5 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการใช้อัลตราโซนิกเล็กรอนแบบส่องกราด

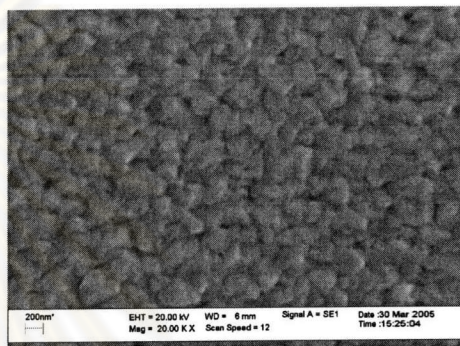
ได้ทำการถ่ายภาพพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มบางเงินที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ซึ่งแสดงผลดังต่อไปนี้

4.5.1 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางเงินโดยการใช้อัลตร้าจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

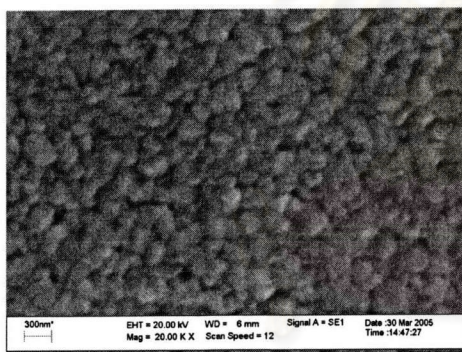
ฟิล์มบางของเงินที่เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์โดยหัวดีซีแมกนิตรอนสปีดเทอริงและระบบดีซีแมกนิตรอนที่สร้างขึ้นที่กำลังไฟฟ้าของการสปีดเทอริงต่างกันตั้งแต่ 13.86-27.73 วัตต์ (Ag1-Ag6) ตามเงื่อนไขของการสปีดเทอริง ได้ถูกตรวจสอบลักษณะพื้นผิวจากอัลตร้าจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.11



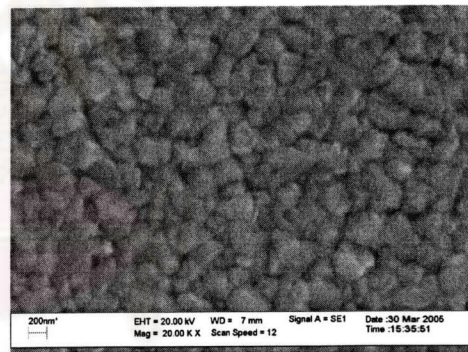
Ag1 (13.86 watt)



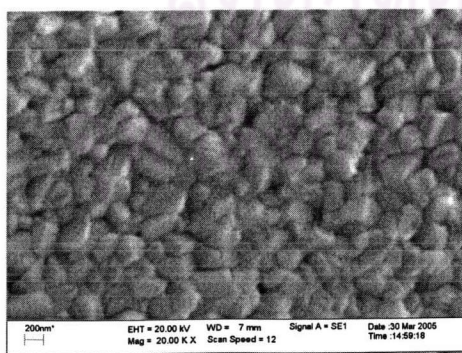
Ag2 (16.77 watt)



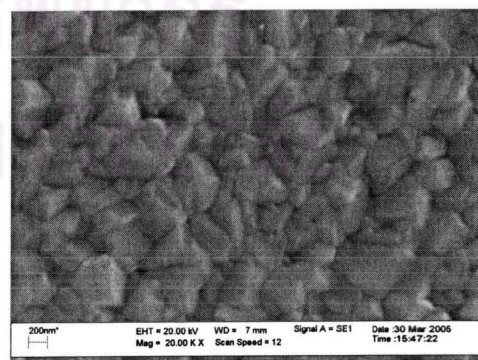
Ag3 (19.36 watt)



Ag4 (22.50 watt)



Ag5 (24.84 watt)



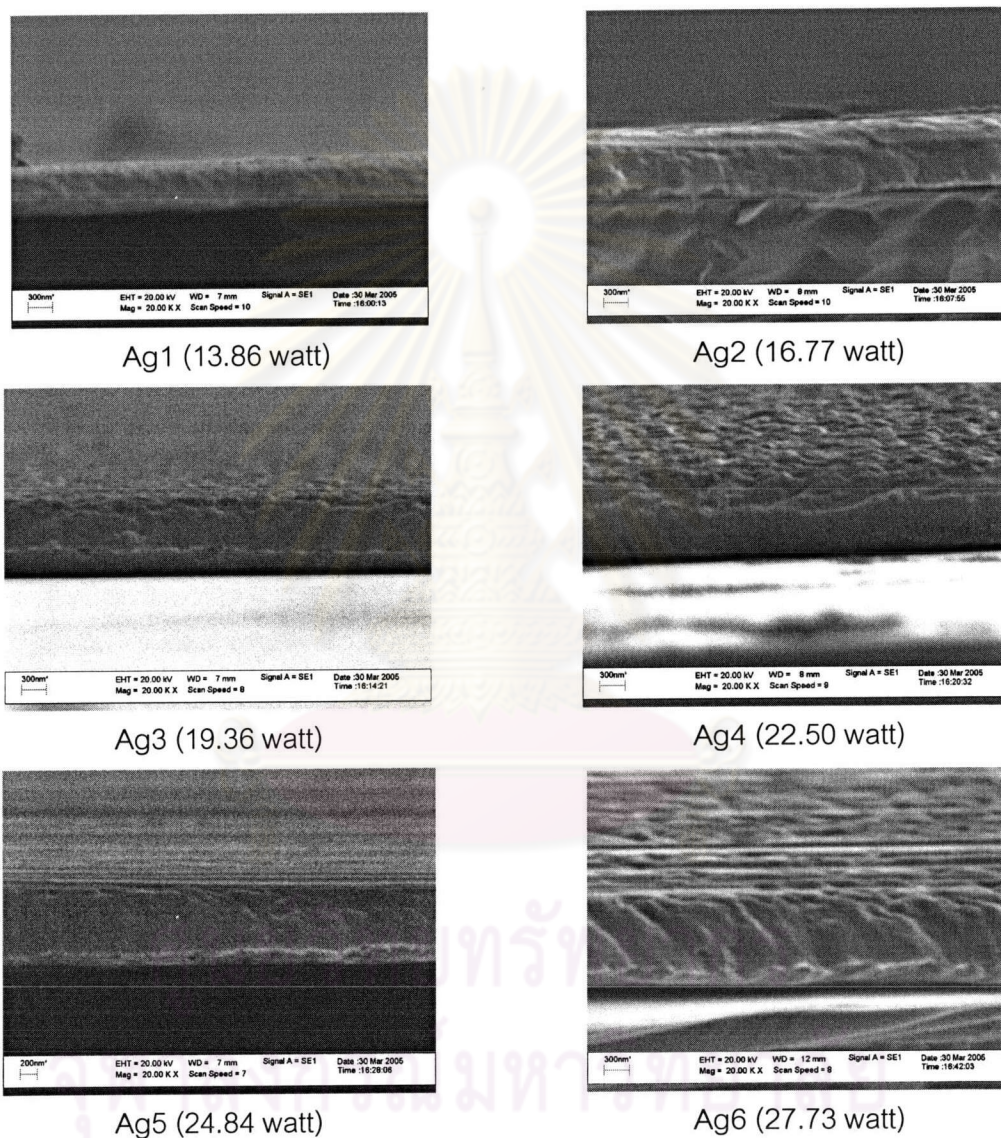
Ag6 (27.73 watt)

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางเงินจากอัลตร้าจูลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปแบบบริเวณโครงสร้าง (structure zone model) ซึ่งแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิ แผ่นรองรับและความดันของก๊าซอาร์กอนที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางโลหะโดยใช้วิธี แมกนิตรอนสปีดเทอริง โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิแผ่นรองรับต่อจุดหลอมเหลว ของโลหะที่เคลือบ [18,40-41] สำหรับโลหะเงินมีจุดหลอมเหลวประมาณ 961 องศาเซลเซียส และจากการทดลองอุณหภูมิของแผ่นรองรับไม่น่าจะเกิน 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง อุณหภูมิแผ่นรองรับต่อจุดหลอมเหลวของโลหะที่เคลือบจึงมีค่าไม่น่าเกิน 0.1 และความดันของ ก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการทดลองประมาณ 3 มิลลิทอร์ เมื่อวิเคราะห์จากรูปแบบบริเวณโครงสร้าง ของฟิล์มบางที่ได้จะอยู่ในบริเวณที่ 1 จากภาพถ่ายในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นเกรนที่เกิดด้าน (faceted grains) ที่พื้นผิวของฟิล์มมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น โดย Ag1 จะประกอบไปด้วยเกรนที่เกิดด้านขนาดเล็กที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุดด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย ประมาณ 127 นาโนเมตร และลักษณะของพื้นผิวจะมีความขรุขระน้อย Ag2-Ag6 จะประกอบไปด้วยเกรนที่เกิดด้านขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความสม่ำเสมอของเกรนที่เป็นเหลี่ยมจะมีค่าลดลงโดยจะ ประกอบไปด้วยเกรนที่เกิดด้านที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางหลายขนาดปะปนกันอยู่ และลักษณะของ พื้นผิวจะมีความขรุขระมากขึ้น โดย Ag6 จะแสดงให้เห็นเกรนที่เกิดด้านขนาดใหญ่และมีลักษณะ เป็นเหลี่ยมชัดเจนที่สุดและมีพื้นผิวที่มีความขรุขระมากที่สุด โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเกรน ที่เกิดด้านโดยเฉลี่ยประมาณ 455 นาโนเมตร จากการทดลองได้นำฟิล์มบางไปถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังจากการเคลือบประมาณ 1 สัปดาห์ จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟิล์มบางเงินกับซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในอากาศเป็นสารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Ag_2S) เคลือบอยู่บนผิวของฟิล์มบางเงิน โดยมีอัตราการเคลือบอยู่ที่ 75 นาโนเมตรต่อสัปดาห์ จึงทำให้ฟิล์มบางเงินที่เตรียมได้มีชั้นของซิลเวอร์ซัลไฟด์เคลือบอยู่ ด้วยความหนาประมาณ 75 นาโนเมตร จึงไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดว่าโครงสร้างพื้นผิวที่ปรากฏเป็นของฟิล์มบางเงิน

4.5.2 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางเงินโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นอกเหนือจากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเงินแล้ว ได้ทำการถ่ายภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบางเงิน ดังแสดงในรูป 4.12

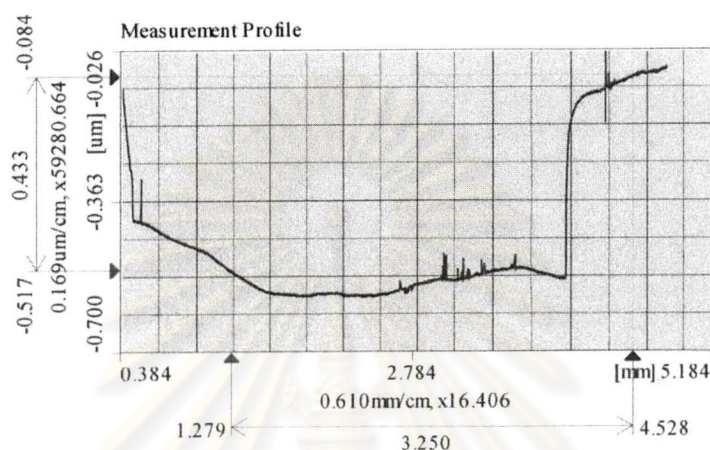


รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางเงินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปแสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 20,000 เท่าของฟิล์มบางเงินที่เคลือบลงบนซิลิกอนเวเฟอร์ตามเงื่อนไขข้างต้นที่กำลังไฟฟ้าต่างกันตั้งแต่ 13.86-27.73 วัตต์ (Ag1-Ag6) ซึ่งจากรูปจะสามารถประมาณความหนาของฟิล์มได้ในช่วง 400-500 นาโนเมตร

4.6 การหาความหนาของฟิล์มบาง

สำหรับฟิล์มบางเงินที่เตรียมได้นั้น ได้ทำการหาความหนาของฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับโดยการใช้เครื่อง Surface Profiler ดังแสดงตัวอย่างผลการหาความหนาที่ได้จากการใช้ Surface Profiler เครื่องของฟิล์ม Ag1 ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างความหนาของฟิล์มบางเงิน Ag1 โดยการใช้เครื่อง Surface Profiler

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบางเงิน Ag1 โดยการใช้เครื่อง Surface Profiler ยี่ห้อ Misutoyo จากภาพในตัวอย่างความหนาของฟิล์มมีค่าประมาณ 433 นาโนเมตร และความหนาของฟิล์ม Ag1-Ag6 ที่ได้จากการใช้เครื่อง Surface Profiler มีค่าอยู่ในช่วง 405-480 นาโนเมตร ซึ่งมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 442.5 นาโนเมตร โดยค่าความหนาของฟิล์ม Ag1-Ag6 ที่ได้จากการใช้เครื่อง Surface Profiler มีค่าใกล้เคียงกับความหนาของฟิล์มที่ได้จากภาพถ่ายภาคตัดขวาง และเมื่อนำความหนาที่ได้มาคำนวณหาอัตราการเคลือบโดยหารด้วยเวลาที่ใช้ในการสเปคโตรริง จะได้อัตราการเคลือบมีค่าอยู่ในช่วง 0.225-0.267 นาโนเมตรต่อวินาที และมีอัตราการเคลือบโดยเฉลี่ยประมาณ 0.246 นาโนเมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าปริมาณของอะตอมเงินที่หลุดออกมาจากเป้าแล้วเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรองรับเคลือบเป็นฟิล์มบางของเงินมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักภายใต้เงื่อนไขของการทดลอง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ของความดันของก๊าซอาร์กอนและกระแสของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ซึ่งน่าจะส่งผลให้ปริมาณการแตกตัวเป็นไอออนของอาร์กอนและพลังงานของไอออนของอาร์กอนมีค่าใกล้เคียงกันจากเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพของการสเปคโตรริงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และน่าจะทำให้อะตอมของเงินที่ถูกสะท้อนจากการชนกับอะตอมของอาร์กอนตกกระทบแผ่นรองรับและเคลือบเป็นฟิล์มบางในอัตราที่ใกล้เคียงกัน