



วิทยานิพนธ์

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสาร
ด้วยลำอิเล็กตรอน ดีซีสputtering และอาร์เอฟสputtering

Property Study of Ni Thin Film Grown by Electron-Beam
Evaporation DC Sputtering and RF Sputtering

นายพนม กาศรุณ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
ดีซีสเปคเตอริงและอาร์เอฟสเปคเตอริง

Property Study of Ni Thin Film Grown by Electron-Beam Evaporation
DC Sputtering and RF Sputtering

นามผู้วิจัย นายพนม กาศรุณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุปรียา ศรีวิจิตรเกษม, Dr.Ing.)

กรรมการ

(อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์, วท.ม.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรรณิภา คงสาคร, M.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์, วท.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 29 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
ดีซีสปีดเตอริงและอาร์เอฟสปีดเตอริง

Property Study of Ni Thin Film Grown by Electron-Beam Evaporation
DC Sputtering and RF Sputtering

โดย

นายพนม กาสรุณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2550

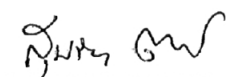
พนม กาสรุณ 2550: การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำ
อิเล็กตรอน วิธีซีสปีดเตอริงและอาร์เอฟสปีดเตอริง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(ฟิสิกส์) สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ ประชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์
สุปรียา ศรีวิจิตรเกษม, Dr. Ing. 87 หน้า

การวิจัยนี้ได้เคลือบฟิล์มบางนิกเกิลบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสาร
ด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
ใช้ผงนิกเกิลบริสุทธิ์ 99.9% เป็นเป้าสารเคลือบ สำหรับวิธีซีสและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงใช้แผ่น
นิกเกิลบริสุทธิ์ 99.9% เป็นเป้าสารเคลือบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.620 เซนติเมตรและหนา 0.318
เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิของเป้าสารประมาณ 10^{-3} ทอร์ ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 6, 7, 8, 9
และ 10 ชั่วโมง แล้วแบ่งฟิล์มตัวอย่างออกเป็น 5 ชุด ชุดที่ 1 ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และชุดที่
2 – 5 ผ่านการอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 °C ตามลำดับ

เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มและอุณหภูมิในการอบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน พบว่าฟิล์มที่
เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเป็นผลึกมากกว่าวิธีซีสปีดเตอริงและวิธีอาร์
เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ จากการศึกษาแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และวิธีหัววัด
ที่จุดพบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเป็นผลึกมากกว่าวิธีซีสปีดเตอ
ริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า

เมื่อใช้สมการเชอร์เรอร์คำนวณขนาดเกรนของฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีทั้งสาม พบว่าฟิล์มที่
เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีซีสปีดเตอริง
และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

พนม กาสรุณ
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

12 / ๕.๖. / ๒๕๕๐

Phanom Kadrun 2007: Property Study of Ni Thin Film Grown by Electron-Beam Evaporation DC Sputtering and RF Sputtering. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Associate Professor Supreya Trivijitkasem, Dr. Ing. 87 pages.

Electron-Beam Evaporation, DC Sputtering and RF Sputtering processes were used to deposit nickel thin film on glass slide substrates. For Electron-Beam Evaporation process, 99.9% pure Ni powder target was used; while DC and RF Sputtering processes, 99.9% pure Ni disk target (7.620 cm diameter and 0.318 cm thickness) were used under argon atmosphere of 10^{-3} torr. The deposition times were 6, 7, 8, 9 and 10 hours. Then the Ni thin films were not annealed or annealed for 3 hours at 100, 200, 300 and 400 °C.

At the same deposition time and annealed temperature, Electron-Beam Evaporation process provided thicker Ni thin film than DC and RF Sputtering processes. From x-ray diffractometer experiment and four point-probe technique, it was found that Electron-Beam Evaporation process provide more crystalline film and less resistivity film than the other two processes.

Grain sizes of the Ni thin film were calculated from Sherrer equation. Electron-Beam Evaporation process provided bigger grain size Ni film than the other processes.

Phanom Kadrun

Student's signature

Supreya J

Thesis Advisor's signature

12 / June / 2007

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สุปรียา ตริวิจิตรเกษม ประธานกรรมการที่ปรึกษาซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อ. เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ กรรมการวิชาเอก ซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ได้ช่วยเหลือ ดูแลและให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน สำหรับคำปรึกษา ความช่วยเหลือ ประสพการณ์ต่างๆ กำลังกายและกำลังใจที่มีให้เสมอมา

พนม กาสรุณ

พฤษภาคม 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร	7
การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	14
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง	19
วิธีดีซีสปีดเทอริง	19
วิธีอาร์เอฟสปีดเทอริง	22
วิธีแมกนีตรอนสปีดเทอริง	24
การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	27
การหาขนาดเกรนโดยสมการเชอร์เรอร์	29
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
การวัดความต้านทานด้วยวิธีหัววัดสี่จุด	34
อุปกรณ์และวิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	47
สรุป	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก	84
ภาคผนวก ข	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	37
2	ชื่อฟิล์มตัวอย่าง เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (t) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (T) ความกว้าง (a) ความยาว (b) และพื้นที่ (A) ของกระจกสไลด์ก่อนการเคลือบฟิล์ม	48
3	มวลก่อนการเคลือบฟิล์ม (m_1) มวลหลังการเคลือบฟิล์ม (m_2) มวลที่เพิ่มขึ้น (Δm) มวลที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ ($\Delta m / A$) ของแผ่นกระจกสไลด์ ความหนาของฟิล์ม (h) และอัตราการเคลือบ (R)	51
4	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (h_{Av}) และอัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย (R_{Av})	54
5	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่หาได้จากระนาบ (011) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง	66
6	ความต่างศักย์ที่วัดได้จากฟิล์มตัวอย่างที่ค่ากระแสไฟฟ้า I	71
7	ความหนา ความชัน และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง	76
ตารางผนวกที่		
ข1	ตารางมาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของนิกเกิล ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า	87

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รูปทรงเรขาคณิตในการเคลือบฟิล์มของสารเคลือบที่มีรูปร่าง (ก) แบบจุด และ (ข) แบบแผ่น	10
2	เข้าหลอมที่กว้าง A และลึก d	12
3	แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทานที่ผลิตในรูปแบบต่างๆ	13
4	ปืนชนิดโฟกัสทางไกล	15
5	อุปกรณ์ต่างๆในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	16
6	การเลี้ยวโค้งของลำอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กภายในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	16
7	วงจรไฟฟ้าที่จัดแบบหยดเพนแดนต์	17
8	แบบจำลองการก่อตัวและการเติบโตของฟิล์ม (ก)แบบเกาะ(ข)แบบชั้น (ค)แบบผสม	18
9	ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องดีซีสปัตเตอริง	19
10	(ก) การเกิดแถบมืดและแถบสว่าง (ข) ศักย์ไฟฟ้า (ค) สนามไฟฟ้า (ง) ความหนาแน่นประจุ และ (จ) กระแสไฟฟ้า ภายในระบบสปัตเตอริง	20
11	แผนภาพภายในเครื่องอาร์เอฟสปัตเตอริง	22
12	แผนภาพภายในเครื่องแมกนีตรอนสปัตเตอริง	24
13	เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า \mathcal{E} และ สนามแม่เหล็ก B (ก),(ค) \mathcal{E} ขนานกับ B (ข) $\mathcal{E}=0$ และ (ง) $\mathcal{E} \perp B$	26
14	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึก	27
15	แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกภายในเครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์	28
16	รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนจากผลึกความหนา t ที่ระนาบเลี้ยวเบนต่างๆ	29
17	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกที่มีความหนา (ก) จำกัด (ข) ไม่จำกัด	30
18	แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
19	วิธีห่าวัดสีจุดสำหรับสารตัวอย่าง (ก) มีความหนามาก และ(ข) มีความหนาน้อย	35
20	เครื่องชั่งอย่างละเอียด	38
21	เตาเผาความร้อนสูง	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง (ก) ภาชนะสุญญากาศ และเกจวัดความดัน (ข) ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน (ค) โรตารีปั๊ม (ง) เทอร์โบปั๊ม (จ) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (ฉ) เครื่องระบายความร้อน	39
23	เครื่องคิฟเฟรกโทมิเตอร์	40
24	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
25	ชุดหัววัดที่จุด	42
26	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีซีซีและวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง	43
27	(ก) มวลที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่เฉลี่ยกับเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์ม t (ข) ความหนาเฉลี่ยของ ฟิล์มและอัตราการเคลือบเฉลี่ยของฟิล์มกับเวลาที่ใช้เคลือบ t	56
28	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $6 E 0 - 6 E 4$ และ $7 E 0 - 7 E 4$	58
29	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $8 E 0 - 8 E 4$ และ $9 E 0 - 9 E 4$	59
30	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $10 E 0 - 10 E 4$ และ $6 D 0 - 6 D 4$	60
31	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $7 D 0 - 7 D 4$ และ $8 D 0 - 8 D 4$	61
32	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $9 D 0 - 9 D 4$ และ $10 D 0 - 10 D 4$	62
33	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $6 R 0 - 6 R 4$ และ $7 R 0 - 7 R 4$	63
34	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $8 R 0 - 8 R 4$ และ $9 R 0 - 9 R 4$	64
35	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $10 R 0 - 10 R 4$	65
36	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มตัวอย่าง	69
37	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ที่เคลือบ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	73
38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ที่เคลือบ เป็นเวลา (ก) 7 ชั่วโมง (ข) 8 ชั่วโมง	74
39	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ที่เคลือบ เป็นเวลา (ก) 9 ชั่วโมง (ข) 10 ชั่วโมง	75

**การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน,
ดีซีสปัตเตอร์ริงและอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง**

**Property Study of Ni Thin Film Grown by Electron-Beam Evaporation ,
DC Sputtering and RF Sputtering**

คำนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางหลายวิธี แต่สามารถแบ่งการเคลือบฟิล์มบางหลักๆ ได้ 2 แบบคือ การเคลือบฟิล์มทางเคมี และการเคลือบฟิล์มทางฟิสิกส์

การเคลือบฟิล์มทางเคมีเรียกว่าวิธี Chemical Vapour Deposition (CVD) อาทิ Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE), Organometallic Vapour Phase Epitaxy (OMVPE) ฯลฯ ในปัจจุบันวิธีเหล่านี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากสารเคลือบยึดติดกับผิวของวัสดุได้ไม่ดี ทำให้หลุดออกได้ง่าย และต้องใช้สารละลายเคมีในกระบวนการเคลือบเป็นจำนวนมาก โดยสารละลายเคมีเหล่านี้เป็นตัวก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม มีอันตรายต่อร่างกาย และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารเคมีตกค้าง

การเคลือบฟิล์มทางฟิสิกส์เรียกว่าวิธี Physical Vapour Deposition (PVD) อาทิ วิธีระเหยสารด้วยความร้อน(Thermal Evaporation), วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน(Electron-Beam Evaporation), วิธีดีซี สปัตเตอร์ริง (DC Sputtering) และ วิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง(RF Sputtering) เป็นต้น

วิธีระเหยสารด้วยความร้อนและวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน เป็นการระเหย สารเคลือบที่อุณหภูมิสูงแล้วเคลือบลงบนแผ่นรองรับ(substrate) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ แต่การยึดเกาะของสารเคลือบบนแผ่นรองรับไม่ค่อยดี จึงต้องพ่นทับด้วยแล็กเกอร์เพื่อให้มีความคงทนสูงขึ้น วิธีดีซีสปัตเตอร์ริงและวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง เป็นการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปัตเตอร์ริง มีพลังงานสูงกว่าพลังงานของอนุภาคที่หลุดออกมาจากกระบวนการ

ระเหยสารมาก เมื่ออนุภาคเหล่านี้ตกกระทบลงบนแผ่นรองรับ จะฝังตัวในเนื้อแผ่นรองรับ ทำให้มีการยึดเกาะของฟิล์มเคลือบดีขึ้น ฟิล์มเคลือบจึงมีความคงทนสูงกว่าวิธีระเหยสาร

การเคลือบฟิล์มแบบวิธีระเหยสารด้วยความร้อนและวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน เหมาะกับสารเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก วิธีดีซีสปีดเตอริง ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการเคลือบ วิธีนี้เหมาะสำหรับสารเคลือบและแผ่นรองรับที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่วิทยุ (radio frequency; RF) วิธีนี้เหมาะสำหรับสารเคลือบและแผ่นรองรับที่เป็นฉนวน

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปีดเตอริงนี้จะให้อัตรา (rate) การเคลือบที่ต่ำมาก จึงมีการใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบการเคลือบฟิล์ม เพื่อเพิ่มอัตราการเคลือบให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งถ้าใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบดีซีสปีดเตอริง เรียกว่า วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง (DC magnetron sputtering) และถ้าใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง เรียกว่า วิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง (RF magnetron sputtering)

การวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลโดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางสามวิธี คือ วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน, วิธีดีซีสปีดเตอริง และ วิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนา (thickness) ของฟิล์มกับอัตราการเคลือบฟิล์ม โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค (microstructure) และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีทั้งสามเมื่อไม่อบ และอบด้วยความร้อน (anneal) ที่อุณหภูมิต่างๆ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลลงบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีสปีดเตอริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง
2. เพื่อศึกษาความหนาของฟิล์มเคลือบ กับอัตราการเคลือบฟิล์ม

3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X - Ray Diffractometion, XRD)
4. เพื่อศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
5. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง โดยการคำนวณหาเลตทิซพารามิเตอร์ และขนาดเกรน
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง โดยวิธีหัววัดสี่จุด (four-point probe)

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางนิกเกิลบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มตั้งแต่ 6-10 ชั่วโมง แล้วศึกษาความหนาของฟิล์มที่อัตราการเคลือบฟิล์มต่างๆ แล้วนำแผ่นฟิล์มที่เคลือบได้มาแบ่งย่อยเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่ได้ผ่านการอบด้วยความร้อน และชุดที่ 2-5 ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 °C ตามลำดับ แล้วศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คำนวณขนาดเกรนของฟิล์มบางด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

การตรวจเอกสาร

Hjortsberg *et al.*(1981) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ In_2O_3 เจือทินออกไซด์ SnO_2 บนกระจก corning 7059 โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ที่อัตราการเคลือบต่างกันและอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน นำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราการเคลือบ 0.2 nm/s และที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 300 °C มีสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าดีที่สุด และเมื่อลดอุณหภูมิแผ่นรองรับลงถึง 150 °C การดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นจะสูงขึ้นจาก 2 % เป็น 8 % และพบว่าฟิล์มบางมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น

Synowicki (1998) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอรริงบนแผ่นรองรับฟิวส์ซิลิกา(fused silica) และนำฟิล์มที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 350 °C นาน 8 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ค่าคงตัวทางแสงด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีโกอิลิปโซมิเตอร์แบบปรับมุมได้ (Variable angle spectroscopic ellipsometer , VASE) พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้แยกเป็น 2 ชั้นย่อย โดยฟิล์มชั้นบนมีค่าความโปร่งแสง (transparency) ต่ำแต่ค่าการดูดกลืนแสงสูง แสดงว่าฟิล์มชั้นบนมีความหนาแน่นมากกว่าและมีการนำไฟฟ้าที่ดี

Salehi (1998) ได้เคลือบฟิล์ม ITO โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน บนแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง และ 80 °C โดยอัตราการเคลือบฟิล์ม (deposition rate) 0.2 Å/s ฟิล์มมีความหนา 1200 Å เท่ากัน จากการวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าและวิเคราะห์สมบัติทางแสงพบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 80 °C มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า และมีค่าความโปร่งแสงในช่วงตามองเห็นสูงกว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าฟิล์มที่เคลือบทั้งสองสภาวะมีความเป็นผลึกเหมือนกัน แต่ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 80 °C แสดงความเป็นผลึกที่สูงและมีขนาดเกรนที่ใหญ่ ทำให้พื้นที่ขอบเกรนลดลง การกระเจิงของอิเล็กตรอนกับโฟตอนลดลง มีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง และความโปร่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

Zhang *et al.*(1999) ได้เคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอรริง อบฟิล์มหลังการเคลือบที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250 °C ด้วยเวลา 40, 80 และ 120 นาที แล้ววัดความหนาฟิล์ม ด้วยเครื่อง n & k Analyser 1280 และวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงระนาบด้วยวิธีหัววัดสี่จุด แล้วคำนวณค่าดัชนีหักเหของแสง (n) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (k) ที่ความยาวคลื่น 600-1100 nm กับ

ค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าเมื่อฟิล์มที่อบและไม่อบมีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่า k จะลดลง ฟิล์มที่นำไฟฟ้าได้ดีจะมีจำนวนตัวพาหะอิสระที่มาก มีผลทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในช่วง NIR ที่สูง

Morton *et al.* (1999) ได้เคลือบฟิล์มบาง ITO แบบใช้ไอออนช่วย (ion – assisted deposition, IAD) บนแผ่นกระจกที่อุณหภูมิ 25 °C โดยมีเงื่อนไขในการเคลือบต่างกัน พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มที่มีความโปร่งแสงมากกว่า 90% คือ อัตราการเคลือบ 8 Å/s อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 18 sccm (standard cubic centimeter per minute) กระแสขับเคลื่อนไอออน (ion drive current) 2 A โดยมีสภาพต้านทานเชิงระนาบเท่ากับ 60 Ω/cm²

Lee *et al.* (1999) ได้เคลือบฟิล์มบาง ITO แบบใช้ไอออนช่วยในวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน โดยเติมก๊าซออกซิเจนเข้าไปในระหว่างการเคลือบ พบว่าฟิล์มบางที่ใช้ไอออนช่วยมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย ค่าความโปร่งแสงมีค่าสูง ดัชนีหักเหของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าลดลง ผิวหน้าฟิล์มมีความเรียบมากขึ้น

Bin *et al.* (2001) ได้เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม(Ti) และสารประกอบ CoCrPtTa บนแผ่นแก้ว ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ความดันของก๊าซอาร์กอน 20 มิลลิทอร์ โดยให้แผ่นรองรับมีอุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 300 °C และใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบจาก 2 ถึง 4 kW โดยกำหนดความหนาของฟิล์ม Ti ที่เคลือบมีค่าระหว่าง 3 ถึง 10.5 nm แล้วศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม พบว่าฟิล์มบาง Ti และสารประกอบ CoCrPtTa ที่มีความหนา 50 nm มีขนาดเกรน 13 nm สมบัติทางแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบและอุณหภูมิของแผ่นรองรับ แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์ม

Liu *et al.* (2003) ได้เคลือบฟิล์ม ITO โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ลำไอออนช่วย (ion beam – assisted deposition, IBAD) บนแผ่นรองรับพิวส์ซิลิกา และกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้องและ 200 °C อัตราการเคลือบ 1.5 Å/s ฟิล์มหนา 1000 Å จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 200 °C ปรากฏพีค (211), (222), (440) และ (622) ที่มีความเข้มสูง แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงและมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง [111] ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการระเหยสาร (ฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง [100]) เมื่อเพิ่มพลังงานของความหนาแน่นกระแสออกซิเจน (oxygen current density) การจัดเรียงตัวจะเปลี่ยน

ทิศทางจาก[111] เป็น [100] เมื่อตรวจสอบความขรุขระของผิวหน้าฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 200 °C มีความเรียบมากกว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิต่ำ การเคลือบฟิล์มบางแบบใช้ลำไอออนช่วย (IBAD) ทำให้ฟิล์มมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น แต่ถ้าใช้ลำไอออนที่มีพลังงานสูงมากจะทำให้ผิวฟิล์มหยาบขึ้น เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับสูงจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงและจำนวนตัวพาหะต่ำลง ขณะที่ตัวพาหะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) สูงขึ้น ฟิล์มที่เจือดีบุกมีการนำไฟฟ้าดีขึ้น และมีการกระเจิงอิเล็กตรอนน้อยลง

ธนัสลา และคณะ (2004) ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีรีแอคทีฟ ดีซี พลาสมาอาร์แมกเนตรอน สปีดเตอริง (DC planar magnetron sputtering) บนแผ่นรองรับที่เป็นแก้ว และสเตนเลสเบอร์ 304 โดยใช้อลูมิเนียมบริสุทธิ์ และก๊าซผสมของอาร์กอนกับออกซิเจนเป็นสารเคลือบ ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะของฟิล์มด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman spectrometer) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าเมื่อทำการเคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.0 และ 1.2 cm³ /s ตามลำดับ ฟิล์มที่ได้มีเฟส α -Al₂O₃ บนระนาบ (012) ที่มุม $2\theta = 25.4$ องศา

เบญจพล (2004) ได้เคลือบฟิล์มบาง Copper Phthalocyanine (CuPc) โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง เมื่อศึกษาฟิล์มบางด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบ โมโนคลินิก (monoclinic) ในระนาบ (200) โดยสภาพความเป็นผลึกขึ้นกับอุณหภูมิที่แผ่นรองรับ ในขณะที่เคลือบฟิล์มบาง เมื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง พบว่าความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนได้ดีคือ 330 และ 620 nm เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มบางประกอบด้วย CuPc ซึ่งมีขนาดนาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับในขณะที่เคลือบฟิล์มมีค่ามากขึ้น ผลึกจะเปลี่ยนลักษณะจากแผ่นไปเป็นแท่งระดับนาโน

นรุฒิ (2005) ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วย วิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้เวลาในการเคลือบเท่ากัน เมื่อศึกษาฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ โดยมีค่าคงตัวแลตทิซ a ระหว่าง 3.9998 – 4.0897 Å และขนาดเกรนของฟิล์มที่เคลือบมีค่าประมาณ 20 – 90 Å เมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

พบว่า ความหนาและความเป็นผลึกของฟิล์มบางมีค่าแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้า และฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีความหนามากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนเป็นวิธีเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ โดยการให้พลังงานความร้อนเข้าไปในอะตอมของของเหลวหรือของแข็ง ทำให้อะตอมมีการระเหยหรือระเหิดแล้วหลุดไปเคลือบบนแผ่นรองรับ สมัยเริ่มแรกใช้ลวดแพลทินัม (platinum) กับ ทังสเตน (tungsten) เป็นเตาหลอม ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เพื่อความเหมาะสมกับรูปแบบงานต่างๆ เตาหลอมที่ใช้ อาทิ ควอตซ์ (quartz), โมลิบดีนัม (molybdenum), แทนทาลัม (tantalum) และ กราไฟต์ (graphite) ฯลฯ

ปฏิกิริยาการระเหยสารทั่วไปที่ประกอบด้วยสารตั้งต้น A, B และสารสุดท้าย C ที่อยู่ในสถานะสมดุล เป็นดังนี้



การอธิบายปฏิกิริยาการระเหยสารต้องใช้ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) ซึ่งจะได้การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free-energy) ΔG ของปฏิกิริยา (1) เป็นดังนี้

$$\Delta G = cG_C - aG_A - bG_B$$

โดย a, b และ c เป็นค่าคงตัว

นิยามของพลังงานอิสระกิบส์ G เป็นดังนี้

$$G = H - TS \quad (2)$$

โดย H เป็นเอนทัลปี (enthalpy), S เป็นเอนโทรปี (entropy) และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

ถ้าระบบเปลี่ยนจากสถานะเริ่มต้น (i) ไปยังสถานะสุดท้าย (f) ที่อุณหภูมิคงตัว T ด้วยปฏิกิริยาเคมี หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ จะได้ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไป $\Delta G = G_f - G_i$ คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

โดย ΔH เป็นเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง

และ ΔS เป็นเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวว่าปฏิกิริยา (1) จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิและความดันคงตัวเมื่อ ΔG มีค่าเป็นลบ นั่นคือ $\Delta G < 0$ ถ้า $\Delta G = 0$ ระบบจะอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่มีการเปลี่ยนแปลง

อัตราการระเหยสาร

เมื่อปี 1882 เฮิร์ตซ์ (Hertz) ได้ระเหยปรอทในสุญญากาศ และพบว่าอัตราการระเหยสารเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของความดันไอสมดุล (equilibrium vapor pressure, P_e) ของสารระเหยกับความดันไฮดรอสแตติก (hydrostatic pressure, P_h) ที่กระทำต่อสารระเหย ซึ่งนำไปสู่สมการพื้นฐาน (basic equation) ของฟลักซ์การระเหย (evaporation flux, Φ_e) ซึ่งจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลาเป็นดังนี้

$$\Phi_e = \frac{\alpha_e N_A (P_e - P_h)}{(2\pi MRT)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

โดย α_e เป็นสัมประสิทธิ์ของการระเหยสาร ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

N_A เป็นเลขอาโวกาโดร (Avogadro's number)

M เป็นมวลโมเลกุล

R เป็นค่าคงตัวก๊าซมีค่าเท่ากับ 1.987 cal/mol K

T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

ถ้า $\alpha_e = 1$ และ $P_h = 0$ จะได้อัตราการระเหยสารที่มากที่สุด ซึ่งจะได้สมการ (4) เป็น

$$\Phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22}}{(MT)^{\frac{1}{2}}} P_e \quad \text{molecules/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (5)$$

เมื่อแปลงสมการ (5) ให้เป็นอัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate, Γ_e) จะได้

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (MT)^{\frac{1}{2}} P_e \quad \text{g/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (6)$$

โดย P_e มีหน่วยเป็น torr

ของเหลวทุกชนิดมีความสามารถในการระเหยที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งความดันแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้น อัตราการระเหยสารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เพราะอุณหภูมิมิผลต่อความดันไอสมดุลของสารเช่น ที่ความดัน 10^{-2} torr ธาตุเกือบทุกชนิดมีค่า $\Gamma_e \approx 10^{-4}$ g/cm²·s

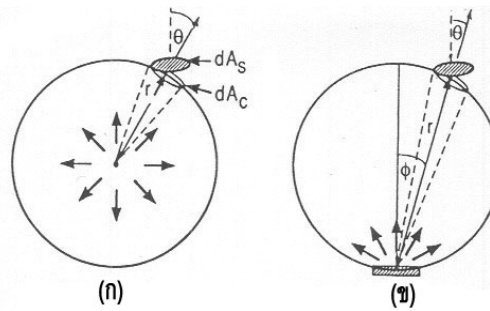
รูปทรงเรขาคณิตในการเคลือบฟิล์ม

การเคลือบฟิล์มต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่ใช้วางสารเคลือบและแผ่นรองรับที่จะรับอะตอมที่ระเหยจากสารเคลือบ ซึ่งมีผลต่อความสม่ำเสมอของการเคลือบฟิล์มบาง มวลสารทั้งหมดที่ระเหยออกมา (total evaporation mass; \overline{M}_e) สามารถหาได้จากการชั่งมวลของสารเคลือบก่อนและหลังการระเหย

ในกรณีสารเคลือบแบบจุด มวลสารทั้งหมดที่ระเหยออกมา \overline{M}_e หาได้จาก

$$\overline{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (7)$$

โดย dA_e เป็นพื้นที่ผิวเล็กๆของสารเคลือบ
และ t เป็นเวลา



ภาพที่ 1 รูปทรงเรขาคณิตในการเคลือบฟิล์มของสารเคลือบที่มีรูปร่าง

(ก) แบบจุด และ (ข) แบบแผ่น

อะตอมที่ระเหยออกจากสารเคลือบจะกระจายออกรอบๆสารเคลือบ และมวล $d\overline{M}_s$ จะตกบนพื้นที่ dA_s บนแผ่นรองรับดังภาพที่ 1 (ก) เมื่อ โปรเจกต์พื้นที่ dA_s บนพื้นที่ผิวทรงกลม dA_c ที่ห่างจากสารเคลือบเป็นระยะ r จะได้

$$dA_c = dA_s \cos \theta \quad (8)$$

โดย θ เป็นมุมระหว่างแนวตั้งฉากของแผ่นรองรับกับแนวรัศมีจากสารเคลือบไปยังระนาบของแผ่นรองรับ

จากหลักของสัดส่วนจะได้

$$\frac{d\overline{M}_s}{M_c} = \frac{dA_c}{4\pi r^2}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{d\overline{M}_s}{dA_s} = \left[\frac{M_c \cos \theta}{4\pi r^2} \right] \quad (9)$$

จากสมการ (9) จะได้มวลที่เคลือบต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วย g/cm^2 ซึ่งแปรผกผันกับระยะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับยกกำลังสอง (r^2) สำหรับการเคลือบฟิล์มในหนึ่งหน่วยเวลาจะได้อัตราการเคลือบฟิล์ม R ในหน่วย $atom/cm^2 \cdot s$ ซึ่งมีหน่วยเหมือนกับ Φ_c ในสมการ (4) อัตราการ

เคลือบฟิล์มขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วางแผ่นรองรับและระยะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับ โดยทั่วไปนิยามวางแผ่นรองรับในแนวทำมุม $\theta=0$ หรือ $\cos\theta=1$ ซึ่งเป็นการเคลือบที่ได้ฟิล์มหนาสม่ำเสมอ

ในทางปฏิบัติ การเคลือบฟิล์มบางไม่สามารถใช้สารเคลือบที่มีรูปร่างแบบจุด ดังนั้นจึงวางสารเคลือบในภาชนะปิดที่มีรูเล็กๆ ให้ระเหยที่ระเหยจากสารเคลือบผ่านออกมา ซึ่งจากทฤษฎีจลน์ของก๊าซกล่าวว่า โมเลกุลของไอที่ไหลผ่านรูออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\cos\phi$ (โดย ϕ เป็นมุมระหว่างแนวตั้งฉากของสารเคลือบกับแนวรัศมีไปยังพื้นที่ dA_c ของแผ่นรองรับ ดังภาพที่ 1(ข)) ดังนั้น มวลที่เคลือบต่อหน่วยพื้นที่เป็น

$$\frac{d\overline{M}_s}{dA_s} = \frac{\overline{M}_c}{\pi r^2} \cos\phi \cos\theta \quad (10)$$

สมการ (10) ใช้ได้กับกรณีของสารเคลือบที่มีรูปร่างแบบแผ่น สำหรับกรณีวางสารเคลือบในเบ้าหลอม (crucible) จะได้มวลที่เคลือบบนแผ่นรองรับต่อหน่วยพื้นที่เป็น

$$\frac{d\overline{M}_s}{dA_s} = \frac{\overline{M}_c}{2\pi r^2} (n+1) \cos^n\phi \cos\theta \quad ; \quad n \geq 0 \quad (11)$$

โดย n เป็นตัวเลขขึ้นอยู่กับรูปทรงของเบ้าหลอม ดังภาพที่ 2 ซึ่ง

$$n = \frac{d}{A} \quad (12)$$

โดย d และ A เป็นความลึกและความกว้างของเบ้าหลอม ตามลำดับ

ถ้า d ลึกและ A แคบ จะได้ n มีค่ามาก

ถ้า $n=0$ สมการ (11) ใช้ได้กับสารเคลือบที่มีรูปร่างแบบจุด

ถ้า $n=1$ สมการ (11) ใช้ได้กับสารเคลือบที่มีรูปร่างแบบแผ่น

ถ้า $n > 1$ สมการ (11) ใช้ได้กับสารเคลือบที่วางอยู่ในเบ้าหลอม



ภาพที่ 2 เบ้าหลอมที่กว้าง A และลึก d

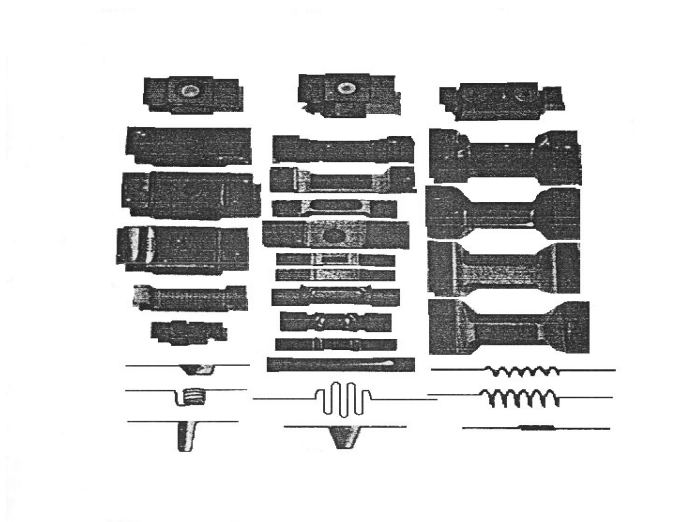
แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสาร

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน ต้องใช้แหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อระเหยสารที่ต้องการนำมาเคลือบบนแผ่นรองรับ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ตัวต้านทาน หรือขดลวดเหนี่ยวนำร้อนขึ้น แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารมีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน ทำจากโลหะ ทังสเตน , แทนทาลัม และโมลิบดีนัม ซึ่งมีรูปแบบต่างๆกัน ดังภาพที่ 3 ซึ่งอยู่ในรูปของขดลวดพันรอบเดียว หรือพันเป็นเกลียวทรงกระบอก หรือรูปโคน โดยขดลวดเกลียวทรงกระบอกใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายได้ช้า สำหรับขดลวดทังสเตนสามารถทำงานได้ถึงอุณหภูมิ 2200 K ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ในรูปแผ่นโลหะ จะมีความต้านทานไฟฟ้าในตัวเอง

2. เตาระเหิด (sublimation furnace) ใช้สำหรับระเหยสารที่เป็นผงหรือผงอัดเม็ด (pellet) เช่นการระเหย ซัลไฟด์, ซีลีไนด์ และสารประกอบออกไซด์บางชนิด โดยมีแผ่นตะแกรง (baffle) ภายในเตา เพื่อป้องกันการกระเด็นหลุดออกมาของอนุภาคที่มาจากการหมุนเวียนของก๊าซที่อัดแน่นและเพื่อป้องกันอนุภาคไปเกาะติดกับแผ่นรองรับ ซึ่งแผ่นตะแกรงจะยอมให้โมเลกุล หรืออะตอมของสารเคลือบเท่านั้นที่ผ่านได้

3. เบ้าหลอม ทำจากโบรอนไนไตรด์, กราไฟต์, ออกไซด์ และโลหะทนความร้อนสูง เป็นต้น มีลักษณะเป็นถ้วยทรงกระบอก ซึ่งได้รับความร้อนจากขดลวดทังสเตนที่พันล้อมรอบด้วย



ภาพที่ 3 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทานที่ผลิตในรูปแบบต่างๆ

การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน

อุณหภูมิของขดลวดความร้อนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบการระเหยสาร จึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า P ที่จ่ายเข้าไปกับอุณหภูมิ T กำลังไฟฟ้ามี่ความสัมพันธ์กับกระแส I และความต้านทาน R ดังนี้

$$P = I^2 R \quad (13)$$

สำหรับเส้นลวดที่ยาว l และพื้นที่หน้าตัดเป็น A จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho(T)$ ที่อุณหภูมิ T ดังนี้

$$R(T) = \rho(T) \frac{l}{A} \quad (14)$$

สภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho(T)$ ของโลหะมีค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ T ดังความสัมพันธ์

$$\rho(T) = \rho(0) \left[\frac{T}{T(0)} \right]^n \quad (15)$$

โดย $\rho(0)$ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิอ้างอิง $T(0)$

และ n เป็นค่าคงตัวซึ่งโดยทั่วไปมีค่าเข้าใกล้ 1

ในกรณีทั้งสแตนด์ค่า $\rho(0) = 5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ที่อุณหภูมิ $T(0) = 293 \text{ K}$ และ $n = 1.20$ เมื่อแทนสมการ (14) และ (15) ในสมการ (13) จะได้

$$P = I^2 \rho(0) \left[\frac{T}{T(0)} \right]^n \frac{1}{A} \quad (16)$$

ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของตัวต้านทานได้เมื่อรู้ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป และขนาดของตัวต้านทาน

ในทำนองเดียวกัน การประมาณค่าอุณหภูมิจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในไส้หลอด (filament) โดยใช้ กฎสเตฟาน-โบลซ์มาน (Stefan-Boltzman law) ซึ่งถือว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปทั้งหมดทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวไส้หลอด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการแผ่รังสี (radiated power) P กับอุณหภูมิ T เป็นดังสมการ

$$P = \epsilon \sigma A [T^4 - T(0)^4] \quad (17)$$

โดย ϵ เป็น ค่าการปล่อยพลังงานรังสีจากผิวหน้า

σ เป็น ค่าคงตัวสเตฟาน เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

และ A เป็นพื้นที่ผิวของไส้หลอด

สมการ (16) และ (17) เหมาะสำหรับไส้หลอดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบขดลวด

การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทานหรือเตาระเหยหรือเบ้าหลอมนั้น มีข้อเสียคือ

1. มีสิ่งปนเปื้อนออกมาจากวัสดุที่ใช้ทำแหล่งกำเนิดความร้อน จึงเป็นการยากในการเคลือบฟิล์มที่บริสุทธิ์มากๆ

2. มีขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดความร้อน จึงเป็นการยากในการระเหยสารที่มีจุดหลอมเหลวสูง

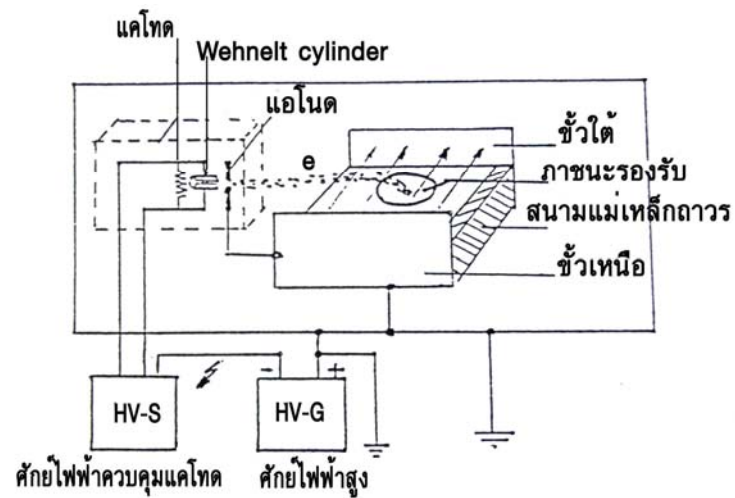
การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน เป็นวิธีระเหยสารโดยไม่มีสารอบริสุทธิ์ปนเปื้อนออกมา และสามารถเคลือบสารมากกว่า 1 ชนิดได้อย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการระเหยสาร ในระดับอังstromต่อวินาทีจนถึงไมโครเมตรต่อวินาที การระเหยสารด้วยวิธีนี้ เป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนโดยตรงจากลำอิเล็กตรอนให้กับสารเคลือบ โดยไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเคลือบกับภาชนะรองรับ จึงสามารถใช้น้ำระบายความร้อนออกจากภาชนะรองรับ

แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางคือ หลอดรังสีแคโทด (cathode) ซึ่งยิงอิเล็กตรอนออกจากแคโทดที่ร้อน ปืนที่ใช้ยิงอิเล็กตรอนมีหลายชนิดได้แก่

1. ปืนชนิดเทอร์มิออนิก (thermionic) ให้ลำอิเล็กตรอนโดยการให้ความร้อนกับวัสดุทนความร้อนสูง เช่น ทังสเตน ซึ่งอาจมีรูปเป็นไส้หลอด หรือเป็นแท่ง (rod) หรือเป็นแผ่นจาน (disk)
2. ปืนชนิดพลาสมา (plasma) ให้ลำอิเล็กตรอนซึ่งแยกมาจากพลาสมาที่ถูกกักในบริเวณแคบๆ
3. ปืนชนิดโฟกัสทางไกล (teletfocus) อิเล็กตรอนที่เกิดจากแคโทดร้อนจะถูกเร่งผ่านช่องแอโนด (anode) และถูกโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กไปที่ตำแหน่งจัดวางสารเคลือบ ดังภาพที่ 4 ปืนอิเล็กตรอนชนิดนี้ให้ลำอิเล็กตรอนเป็นแนวตรงและมีความหนาแน่นพลังงานสูงพอที่จะให้ความร้อนกับสารเคลือบที่อยู่ในระยะห่างออกไป สามารถระเหยสารที่ทนความร้อนสูงกว่า 3000°C

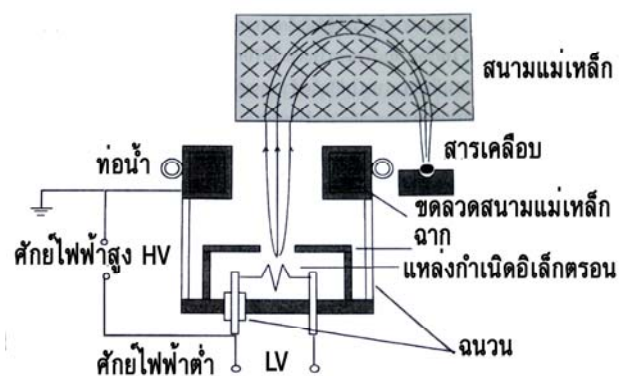


ภาพที่ 4 ปืนชนิดโฟกัสทางไกล

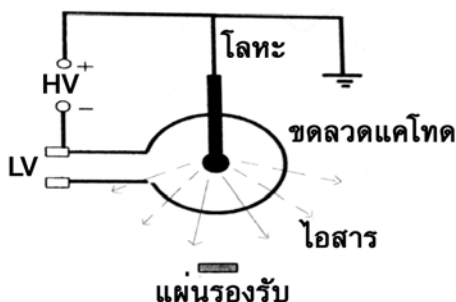


ภาพที่ 5 อุปกรณ์ต่างๆในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วย ทรงกระบอกวีเฮนลต์ (Wehnelt) ดังภาพที่ 5 เพื่อบีบอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนก่อนถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง เคลื่อนไปในแอโนดและตรงไปยังเลนส์แม่เหล็ก ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนทำให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งด้วยแรงแม่เหล็ก ดังภาพที่ 6 แล้วถูกโฟกัสไปชนสารเคลือบซึ่งสามารถเปลี่ยนตำแหน่งที่อิเล็กตรอนไปชนสารเคลือบได้ โดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์สูงและกระแสไฟฟ้าที่ให้กับแม่เหล็ก ลำอิเล็กตรอนจะเลี้ยวโค้งไปยังสารเคลือบ และลำอิเล็กตรอนจะถ่ายโอนพลังงานให้กับอะตอมสารเคลือบ ทำให้อะตอมระเหยออกมา



ภาพที่ 6 การเลี้ยวโค้งของลำอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กภายในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน



ภาพที่ 7 วงจรไฟฟ้าที่จัดแบบหยดเพนแดนต์

ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วย แคโทดร้อนซึ่งขดเป็นวงรอบโลหะที่เป็นสารเคลือบด้วยวงจรไฟฟ้าแบบหยดเพนแดนต์ (pendant drop) ดังภาพที่ 7 เหมาะสำหรับโลหะที่มีความตึงผิวสูง และที่จุดหลอมเหลวมีความดันไอสูงกว่า 10^{-3} torr ลำอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจะเข้าสู่ศูนย์กลางของขดลวดแคโทด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่วางโลหะที่เป็นสารเคลือบรูปทรงกระบอก อะตอมที่ระเหยออกจากบริเวณปลายแท่งโลหะซึ่งเป็นส่วนที่หลอมละลาย จะไปเคลือบที่แผ่นรองรับที่วางอยู่ด้านล่าง การระเหยสารด้วยวิธีนี้ต้องควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของสารสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว

ภาชนะรองรับที่ใช้ในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับอัตราการระเหยสารที่ต้องการ ภาชนะที่นิยมใช้คือ ทองแดง ทังสเตน กรณีที่ต้องการอัตราการระเหยสารที่สูงขึ้น ต้องใช้ภาชนะที่เป็นฉนวนกันระหว่างสารเคลือบกับภาชนะรองรับ เพื่อกันไม่ให้ความร้อนระบายออกไป และเพื่อกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอ การเลือกวัสดุกันต้องพิจารณาจากการนำความร้อน ความไวต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากสารที่ร้อน และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน วัสดุที่ใช้ทำเป็นวัสดุกันเช่น เซรามิกส์ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 แก้วไฟด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ ฯลฯ

แบบจำลองการก่อตัวและการเติบโตของฟิล์ม

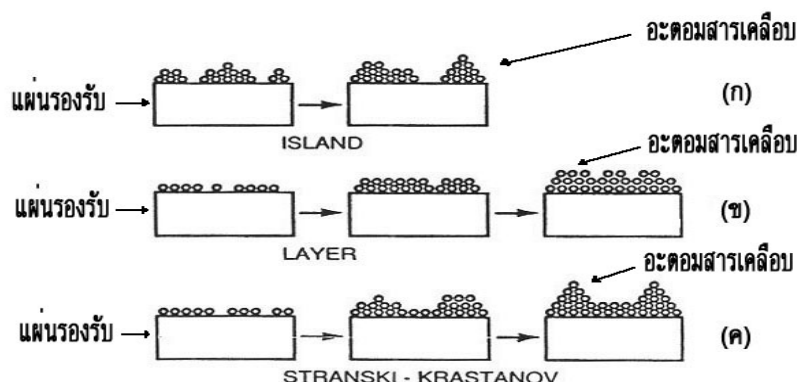
การก่อตัวและการเติบโตของฟิล์มมี 3 แบบ ซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองต่างๆ ดังนี้

ก. แบบจำลอง Volmer-Weber หรือ แบบเกาะ (island) ดังภาพที่ 8 (ก) เกิดจากนิวเคลียสขนาดเล็กที่ก่อตัวบนแผ่นรองรับมีการเติบโตใน 3 มิติ แล้วก่อตัวเป็นเกาะ การเติบโตในลักษณะนี้

เนื่องจากอะตอมหรือโมเลกุลมีการยึดเกาะกันเองดีกว่ายึดเกาะกับแผ่นรองรับ เช่นฟิล์มโลหะและสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นวัสดุออกไซด์

ข. แบบจำลอง Frank-van der Merwe หรือ แบบชั้น (layer) ดังภาพที่ 8 (ข) เกิดจากนิวเคลียสขนาดเล็กขยายตัวออกไปในระนาบใน 2 มิติ และก่อตัวเป็นฟิล์มชั้นแรกแล้วก่อตัวเป็นฟิล์มชั้นต่อมา การเติบโตในลักษณะนี้เนื่องจากอะตอมมีการยึดเกาะกับแผ่นรองรับได้ดีกว่ายึดเกาะกันเอง

ค. แบบจำลอง Stranski-Krastanov ดังภาพที่ 8 (ค) ซึ่งพบในระบบฟิล์มโลหะกับโลหะและระบบฟิล์มโลหะกับสารกึ่งตัวนำ มีลักษณะการเติบโตแบบ 3 มิติ และก่อตัวเป็นฟิล์มแบบระนาบชั้นเดียวหรือหลายชั้นบนแผ่นรองรับ หลังจากนั้นจะก่อตัวแบบเกาะบนฟิล์มที่ก่อตัวแบบชั้น



ภาพที่ 8 แบบจำลองการก่อตัวและการเติบโตของฟิล์ม (ก)แบบเกาะ (ข)แบบชั้น (ค)แบบผสม

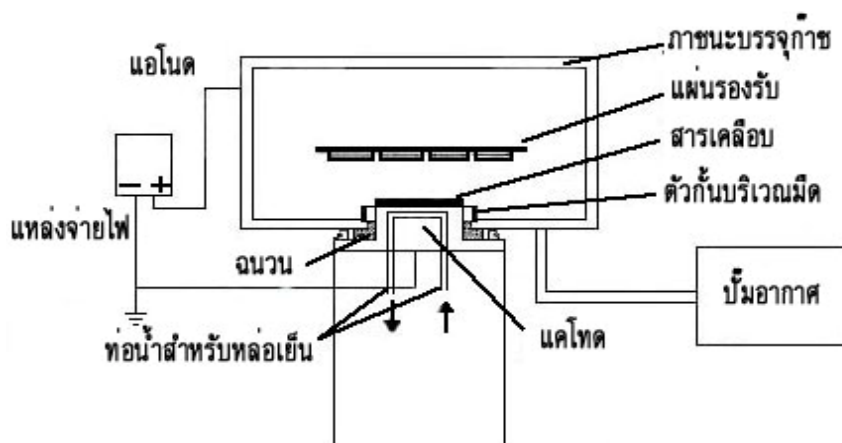
กลไกการก่อตัวและการเติบโตของฟิล์มแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับพลังงานผิวของฟิล์มและแรงยึดเกาะระหว่างแผ่นรองรับกับอะตอมหรือโมเลกุลของสารเคลือบ ซึ่งขนาดและจำนวนของนิวเคลียสที่ก่อตัวในตอนเริ่มต้น มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม นอกจากนี้ อุณหภูมิแผ่นรองรับในขณะที่ทำการเคลือบก็มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม ถ้าอุณหภูมิแผ่นรองรับสูง ทำให้อะตอมของสารเคลือบสามารถเคลื่อนตัวได้ดี จึงได้ฟิล์มที่มีการจัดตัวที่หนาแน่นมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยอุณหภูมิแผ่นรองรับที่ต่ำ

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นวิธีหนึ่งในการเคลือบฟิล์มที่ให้ฟิล์มบางที่มีความบริสุทธิ์สูง มีความหนาสม่ำเสมอ และมีความคงทน วิธีนี้ใช้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งถูกเร่งให้มีพลังงานสูง วิ่งเข้าชนอะตอมของสารเคลือบซึ่งอยู่ใกล้ขั้วแคโทด แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอนุภาคที่เข้าชนกับอะตอมของสารเคลือบ ทำให้อะตอมที่ผิวสารเคลือบหลุดออกมาแล้วไปเคลือบบนแผ่นรองรับ ซึ่งอยู่ใกล้ขั้วแอโนด อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่นิยมใช้เป็นไอออนของก๊าซเฉื่อย เช่น ไอออนของก๊าซอาร์กอน ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับอะตอมของสารเคลือบ ตัวแปร (parameter) ที่สำคัญในวิธีสปัตเตอริงคือ ปริมาณสปัตเตอริงยิลด์ (sputtering yield) ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารเคลือบ ลักษณะของไอออนที่เข้าชน การจัดวางอุปกรณ์ และช่วงเวลาของการเกิดก๊าซดิสชาร์จ (discharge) ในกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีดีซีสปัตเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง

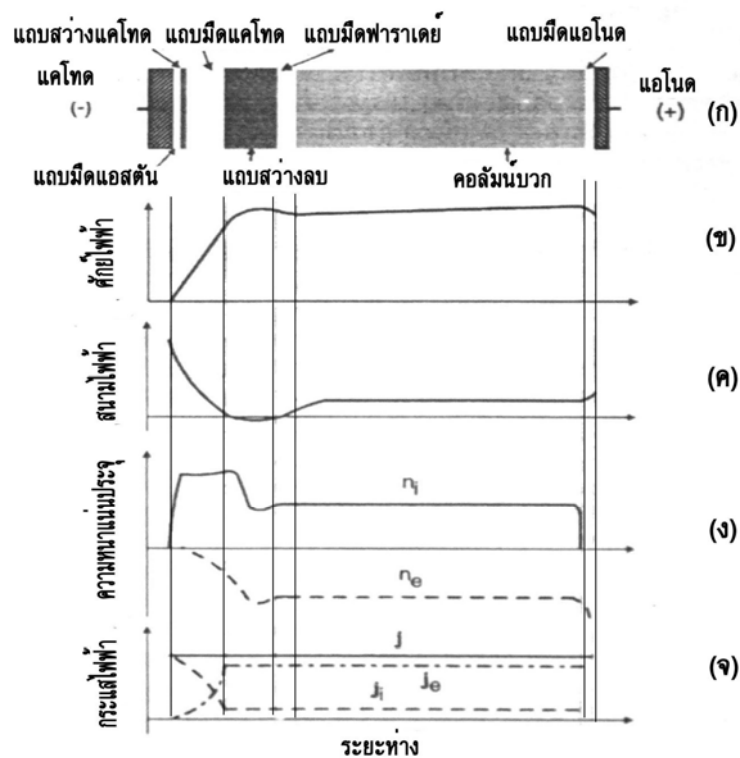
วิธีดีซีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง ดังภาพที่ 9 เป็นกระบวนการเคลือบฟิล์ม โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องดีซีสปัตเตอริง

เมื่อสูบล้ออากาศออกจากเครื่องสปัตเตอริงแล้วปล่อยก๊าซเฉื่อยเช่นก๊าซอาร์กอนเข้าไปในภาชนะโดยใช้ความดันของก๊าซต่ำ เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดดังภาพที่ 10 (ข) ในช่วงที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีพลังงานสูงไม่เพียง



ภาพที่ 10 (ก) การเกิดแฉกมืดและแฉกสว่าง (ข) ศักย์ไฟฟ้า (ค) สนามไฟฟ้า (ง) ความหนาแน่นประจุ และ (จ) กระแสไฟฟ้า ภายในระบบสปัตเตอร์ริง

พอที่จะไอออไนซ์อะตอมของก๊าซได้ ในช่วงนี้จึงเป็นบริเวณมืด ดังภาพที่ 10 (ก) เมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้ามีพลังงานสูงชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย จะถ่ายโอนพลังงานให้กับอะตอมของก๊าซเฉื่อย A ทำให้ก๊าซเฉื่อยแตกตัวออกเป็นไอออนบวก A^+ และอิเล็กตรอน e^- ดังสมการ



อิเล็กตรอน 2 ตัวที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าไปยังแอโนด และชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย 2 ตัว จึงเป็นการเพิ่มจำนวนไอออนและอิเล็กตรอน ในขณะเดียวกันไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทด เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) กระบวนการช่วงนี้เรียกว่าทาวเน็นต์ดิสชาร์จ (townsend discharge) ซึ่งมีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีปริมาณไอออนและอิเล็กตรอนมากพอที่จะรักษาภาพสมดุล

ของการดิสรจาร์จได้โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดจากภายนอก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งเข้าสู่แอโนดอย่างรวดเร็ว แต่ออออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งเข้าสู่แคโทดด้วยความเร็วที่ช้ากว่า อิเล็กตรอนมาก ทำให้บริเวณใกล้ขั้วแคโทดมีไอออนบวกอออยู่มาก

หลังจากอิเล็กตรอนชุดแรกชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อย อิเล็กตรอนชุดนี้จะสูญเสียพลังงานมาก จึงมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะไอออไนซ์ก๊าซเฉื่อยในการชนครั้งต่อไป ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนชุดนี้ชนกับโมเลกุลของก๊าซเฉื่อย จะทำให้โมเลกุลของก๊าซเฉื่อยอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อโมเลกุลของก๊าซเฉื่อยจากสถานะกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้น (ground state) จะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความถี่ของแสง ทำให้บริเวณนั้นเกิดการเรืองแสงขึ้น จึงเรียกว่า ดิซิโกลว์ดิสรจาร์จ (DC glow discharge) การรวมตัวของไอออนบวกของก๊าซเฉื่อยกับอิเล็กตรอนจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความถี่อัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ทำให้เกิดเป็นบริเวณมืด

จากภาพที่ 10 ช่วงแรกเป็นแถบมืดแอสตัน(Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำ ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซได้ และไอออนบวกมีพลังงานสูง ซึ่งเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับอิเล็กตรอน ถัดมาเป็นแถบสว่างแคโทด(cathode glow) เป็นบริเวณที่เกิดการรวมตัวกันของไอออนก๊าซเฉื่อยกับอิเล็กตรอน เกิดเป็นอะตอมก๊าซเฉื่อยแล้วปล่อยแสงออกมา ถัดมาเป็นแถบมืดแคโทด(Crookes or cathode dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำ จนถึงเริ่มมีพลังงานสูงพอที่จะไอออไนซ์ก๊าซเฉื่อยได้ จึงเกิดเป็นแถบมืด ถัดมาเป็นแถบเรืองแสงลบ(negative glow) เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่ 2 ที่มีพลังงานต่ำกับอะตอมก๊าซเฉื่อย ทำให้อะตอมก๊าซเฉื่อยอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น และเมื่อกลับสู่สถานะพื้นจะปล่อยแสงออกมา ถัดมาเป็นแถบมืดฟาราเดย์(Faraday dark space) ซึ่งบริเวณนี้มีอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำสะสมอยู่มาก ทำให้มีการเรืองแสงเล็กน้อย ถัดมาเป็นคอลัมน์เรืองแสงบวก(positive glow column) เป็นบริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้าอ่อนๆ แต่เพียงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานมากพอในการไอออไนซ์อะตอมก๊าซเฉื่อยและแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่าสภาวะพลาสมา ถัดมาเป็นแถบมืดแอโนดและขั้วแอโนด ในการสปิตเตอร์ริง มักวางแผ่นรองรับในบริเวณเรืองแสงลบจึงไม่ปรากฏแถบมืดฟาราเดย์และคอลัมน์เรืองแสงบวก

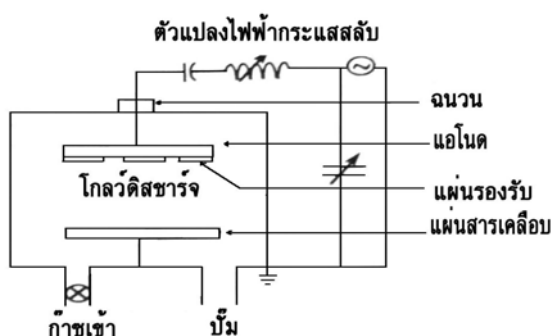
เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้ากระแสดตรง V ระหว่างแอโนดกับแคโทด ศักย์ไฟฟ้าจะแปรผันตามระยะทาง x ดังภาพที่ 10 (ค) และได้สนามไฟฟ้า \mathcal{E} โดย

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx} \quad (19)$$

และได้ความหนาแน่นไอออนบวก n_+ และความหนาแน่นอิเล็กตรอน n_- ดังภาพที่ 10 (ง) และได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 10 (จ)

กระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับเส้นทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับก๊าซเฉื่อย ซึ่งต้องควบคุมให้อยู่ในบริเวณระหว่างแคโทดกับแถบมีดฟาราเดย์ เส้นทางอิสระเฉลี่ยขึ้นกับความดันก๊าซภายในภาชนะ เมื่อความดันก๊าซสูง เส้นทางอิสระเฉลี่ยจะลดลง อะตอมของสารเคลือบจะเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยาก เนื่องจากเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซและสะท้อนกลับ และเมื่อความดันก๊าซมีค่าลดลง เส้นทางอิสระเฉลี่ยมีค่ามากขึ้น ถ้าเส้นทางอิสระเฉลี่ยมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างแคโทดและแอโนด การไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซจะไม่เกิดขึ้น และกระบวนการสปัตเตอริงจะหยุดลง ความดันต่ำสุดที่เป็นไปได้ภายในภาชนะที่ทำให้เกิดการสปัตเตอริง ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแคโทดกับแอโนด แต่ความดันสูงสุดขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งมีเพียงความดันค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการเคลือบที่ดีที่สุด

วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง



ภาพที่ 11 แผนภาพภายในเครื่องอาร์เอฟสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงเป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ดังภาพที่ 11 โดยทั่วไปความถี่ที่ใช้

ในวิธีนี้อยู่ในช่วง 13.56- 40.80 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ให้อัตราการไอออไนซ์สูง การเคลือบฟิล์มในช่วงครึ่งรอบแรกซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก จะเกิดการเคลือบฟิล์มบนแผ่นรองรับ แต่ในช่วงครึ่งรอบหลังซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบ แผ่นฟิล์มที่เคลือบบางส่วนจะถูกสปีดเตอร์หลุดออก แต่น้อยกว่าการเคลือบในครึ่งรอบแรกที่เป็นบวก จึงเกิดกระบวนการเคลือบและหลุดออกสลับกัน เพื่อลดปริมาณสิ่งแปลกปลอม (contamination) ของฟิล์มเคลือบบนแผ่นรองรับ และเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนให้กับระบบ ทำให้เกิดแถบมีดบริเวณขั้วแคโทดและแอโนด การเรืองแสงเกิดในช่วงสั้นๆสลับไปมา

อิเล็กตรอนจากแคโทดที่ไม่เกิดการชนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ($\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$) จะมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (harmonic motion) ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = -q\mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (20)$$

โดย x , m_e และ q เป็นการกระจัด, มวล และประจุ ของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

t , \mathcal{E}_0 และ ω เป็นเวลา, แอมพลิจูดและความถี่เชิงมุม ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับตามลำดับ

ซึ่งจะได้การกระจัดมากที่สุด x_0 ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังนี้

$$x_0 = \frac{q\mathcal{E}_0}{m_e \omega^2} \quad (21)$$

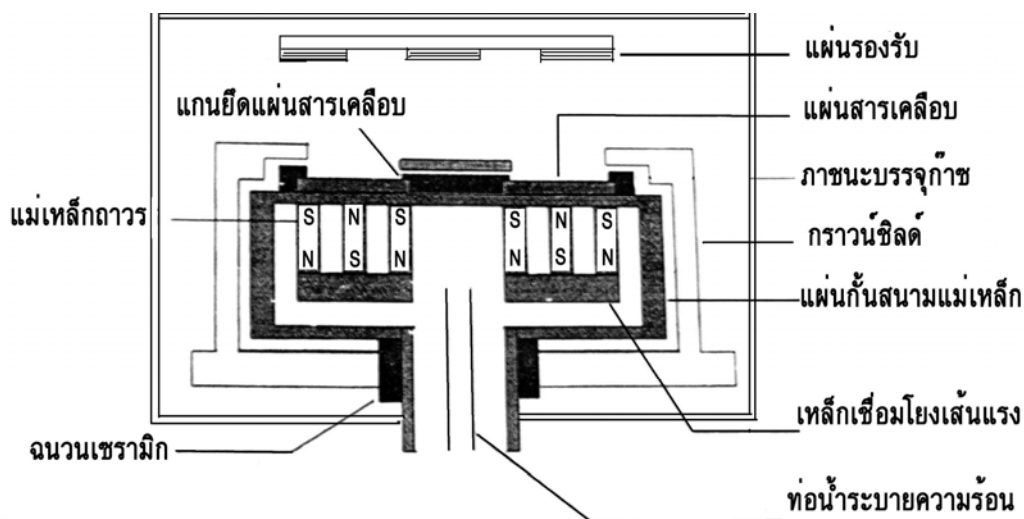
และพลังงานมากที่สุด E_0 เป็น

$$E_0 = \frac{1}{2} (\omega^2 m_e) \left(\frac{q\mathcal{E}_0}{m_e \omega^2} \right)^2 = \frac{(q\mathcal{E}_0)^2}{2m_e \omega^2} \quad (22)$$

ถ้าพลังงาน E_0 ที่ใช้อิออไนซ์อะตอมอาร์กอนเท่ากับ 15.70 eV และความถี่คลื่นวิทยุที่ใช้ในอาร์เอฟสปีดเตอริงเป็น 13.56 MHz จะได้ $\omega = 2\pi(13.56 \times 10^6 \text{ Hz})$ เมื่อแทนในสมการ (22) จะได้ $\mathcal{E}_0 = 11.5 \text{ V/cm}$ ซึ่งเป็นความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้เกิดพลาสมา

ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมของก๊าซเฉื่อยแบบไม่ยืดหยุ่น จะสามารถทำให้เกิดพลาสมาได้ที่สนามไฟฟ้าต่ำกว่า \mathcal{E}_0

แมกนิตรอนสปีดเตอริง



ภาพที่ 12 แผนภาพภายในเครื่องแมกนิตรอนสปีดเตอริง

แมกนิตรอนสปีดเตอริงเป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มอัตราการเคลือบฟิล์ม โดยการใส่สนามแม่เหล็กให้กับระบบสปีดเตอริง ดังภาพที่ 12 เพื่อเพิ่มปริมาณอิเล็กตรอนบริเวณผิวแคโทด แมกนิตรอนสปีดเตอริงใช้ได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า ดีซี แมกนิตรอนสปีดเตอริง ถ้าเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกว่า อาร์เอฟ แมกนิตรอนสปีดเตอริง

สนามแม่เหล็กที่ใช้ในระบบแมกนิตรอนสปีดเตอริงมี 2 แบบ ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามยาว(longitudinal field) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณ

ไอออนไม่สูง แต่สามารถเคลือบฟิล์มได้สม่ำเสมอ และไม่ทำให้แนวการเกิดโกลด์ดิซซาร์จเปลี่ยนแปลงไป ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามตามขวาง (transverse field) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณไอออนดีกว่าสนามตามยาว และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเคลือบฟิล์ม

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสนามแม่เหล็ก B และสนามไฟฟ้า E สามารถอธิบายได้ด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz force) ดังนี้

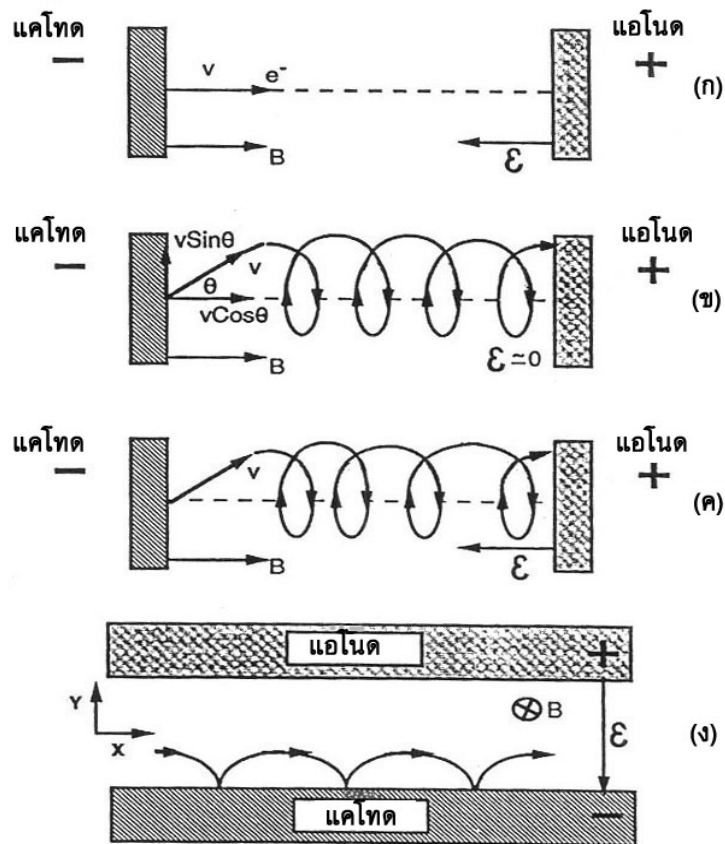
$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (23)$$

โดย q, m และ v เป็นประจุ, มวล และความเร็ว ของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

เมื่อสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B มีทิศขนานกัน และถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกจากแคโทดมีความเร็ว v ในทิศขนานกับ B จะได้ $\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$ จึงเหลือแรงกระทำกับอิเล็กตรอนเป็น $F = qE$ ซึ่งเร่งอิเล็กตรอนไปยังแอโนด ดังภาพที่ 13 (ก) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดด้วยพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้า $E = 0$ และอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกจากแคโทดเคลื่อนที่ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก B ดังภาพที่ 13 (ข) จะได้แรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเป็น $F = qvB \sin \theta$ ซึ่งแรง F มีทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก B ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงโค้งเกลียว (helix) รอบแนวสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้รัศมีของวงโค้งเกลียว ดังนี้

$$r = \frac{mv \sin \theta}{qB} \quad (24)$$

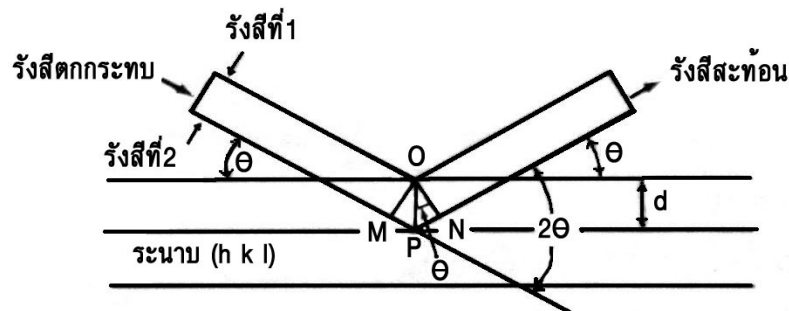
เมื่ออิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกจากแคโทดมีความเร็ว v ทำมุม θ กับสนามแม่เหล็ก B ซึ่งขนานกับสนามไฟฟ้า E จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 13 (ค) ซึ่งมีช่วงเกลียวกว้างขึ้นตามเวลา เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกหน่วงในสนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ ดังนั้นสนามแม่เหล็กช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในสนามนานขึ้น จึงมีโอกาสชนอะตอมก๊าซเฉื่อยเพื่อให้เกิดการดิซซาร์จ และได้ไอออนบวกมากขึ้น



ภาพที่ 13 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า \mathcal{E} และสนามแม่เหล็ก B
 (ก) , (ค) \mathcal{E} ขนานกับ B (ข) $\mathcal{E} = 0$ และ (ง) $\mathcal{E} \perp B$

เมื่อสนามแม่เหล็ก B มีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า \mathcal{E} อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกจากแคโทดจะไม่เคลื่อนที่ไปยังแอโนด แต่ถูกจับให้เคลื่อนที่ใกล้แคโทดเป็นแนวโค้งไซคลอยด์ (cycloid) ดังภาพที่ 13 (ง) โดยต้องจัดให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในรูปไซคลอยด์อยู่ในบริเวณแถบมืดแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็ก จึงมีโอกาที่อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยมากขึ้น และสามารถผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมามากขึ้น ถ้าจัดให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งอยู่ในบริเวณแถบสว่างลบบซึ่งมีสนามไฟฟ้าน้อย จะได้เส้นทางการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลม ซึ่งจับเคลื่อนให้อิเล็กตรอนกลับไปยังแถบมืดหรือตรงไปยังแอโนด ทำให้ออกาสที่อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยน้อยกว่าการจัดแบบแรก

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



ภาพที่ 14 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึก

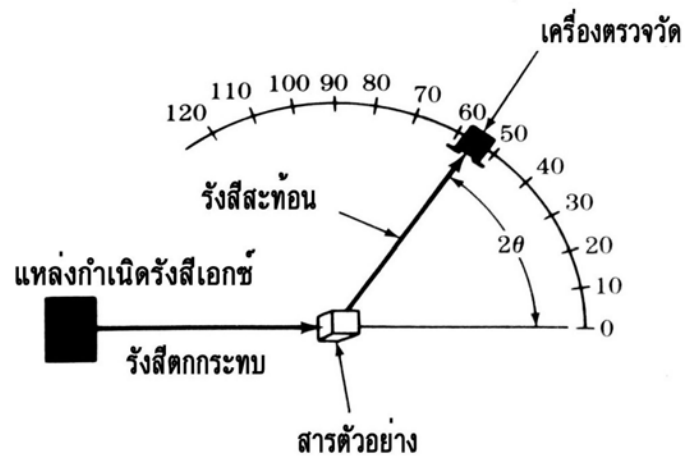
เมื่อรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic wavelength, λ) ผ่านเข้าไปในผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 14 พิจารณารังสีที่ 1 และ 2 ซึ่งตกกระทบระนาบ (h k l) ของอะตอมเป็นมุม θ แล้วรังสีทั้งสองเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน รังสีที่ 2 ต้องเดินทางด้วยระยะทางที่มากกว่ารังสีที่ 1 เท่ากับ $MP+PN$ ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคูณด้วยความยาวคลื่น ดังนี้

$$n\lambda = MP + PN \quad (25)$$

โดย n เป็นลำดับการเลี้ยวเบน (diffraction order) เท่ากับ 1,2,3,....

จากภาพที่ 14 จะได้ $MP = PN = d \sin \theta$ โดย d เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ (interplanar spacing) เมื่อแทนค่าลงในสมการ (25) จะได้ กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังนี้

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (26)$$



ภาพที่ 15 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกภายในเครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์

เครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (diffractometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างของผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ วิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกคือ วิธีแบบผง (powder method) โดยผ่านรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่างที่บดเป็นผงละเอียด รังสีที่เลี้ยวเบนจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องตรวจวัด (detector) ดังภาพที่ 15 ข้อมูลจากเครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์จะถูกบันทึกเป็นกราฟ ระหว่างมุม 2θ กับจำนวนสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดนับได้ในเวลาหนึ่งวินาที ข้อมูลจากกราฟดังกล่าวสามารถนำมาตรวจเทียบกับตารางมาตรฐาน เพื่อหาระนาบ (h k l) ที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาแลตทิซพารามิเตอร์ a , b และ c ของผลึก สำหรับโครงผลึกแบบต่างๆ ระยะห่าง d ระหว่างระนาบ (h k l) มีความสัมพันธ์กับแลตทิซพารามิเตอร์ ดังนี้

$$\text{ผลึกลูกบาศก์} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{1}{a^2}(h^2 + k^2 + l^2) \quad (27)$$

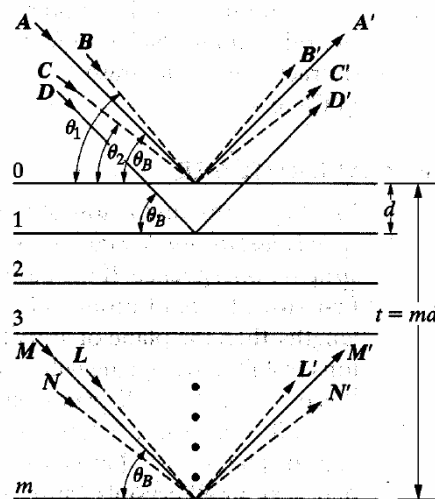
$$\text{ผลึกเททราฮีดรอล} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (28)$$

$$\text{ผลึกออร์โธโรอมบิก} \quad \frac{1}{d^2} = \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) \quad (29)$$

การหาขนาดเกรนของโครงสร้างจุลภาคโดยสมการเซอร์เรอร์

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์ สามารถนำมาใช้คำนวณหาโครงสร้างจุลภาคได้ เช่น ขนาดเกรนและความเครียดจุลภาค ขนาดเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการเซอร์เรอร์ (Scherrer) และวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์ของ Warren-Averbach การคำนวณในวิธีหลังนั้นมีความซับซ้อนกว่าวิธีแรกมาก ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการหาขนาดเกรนโดยสมการเซอร์เรอร์

พิจารณารังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบผลึกที่หนา t ถ้ารังสีตกกระทบผิวบนสุดของผลึกตามเส้นทาง A, B และ C ซึ่งทำมุมแบรกก์ θ_B, θ_1 และ θ_2 กับระนาบเลี้ยวเบน ดังภาพที่ 16 จะได้รังสีสะท้อนจากเส้นทาง A', B' และ C' ทำมุม θ_B, θ_1 และ θ_2 กับระนาบเลี้ยวเบนตามลำดับ



ภาพที่ 16 รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนจากผลึกความหนา t ที่ระนาบเลี้ยวเบนต่าง ๆ

ถ้าให้ θ_1 เป็นมุมที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน เส้นทาง B-O-B' กับเส้นทาง L-O'-L' จะมีระยะที่ต่างกันเป็น $(m+1)\lambda$ โดย m เป็นเลขจำนวนเต็มใด ๆ ที่ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม $2\theta_1$ ดังภาพที่ 17 ดังนั้นจะได้

$$2t \sin \theta_1 = (m+1)\lambda \quad (30)$$

ถ้าให้ θ_2 เป็นมุมที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน เส้นทาง $C-O-C'$ กับเส้นทาง $N-O'-N'$ จะมีระยะที่ต่างกันเป็น $(m-1)\lambda$ ที่ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม $2\theta_2$ ดังภาพที่ 17 ดังนั้นจะได้

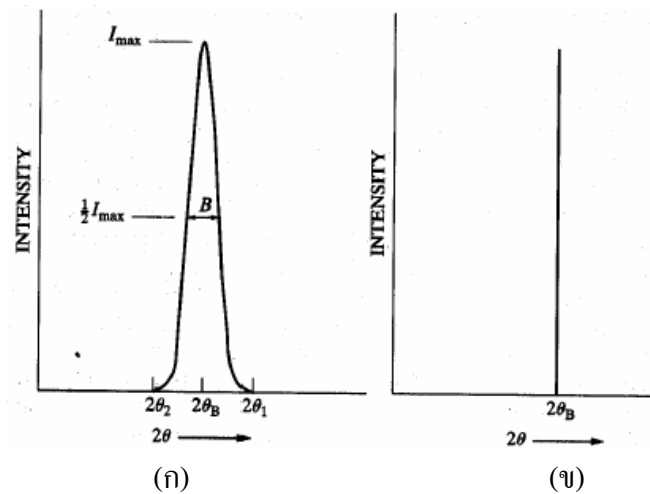
$$2t \sin \theta_2 = (m-1)\lambda \quad (31)$$

เมื่อนำสมการ (30) และ (31) มาลบกับ จะได้

$$t (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = \lambda \quad (32)$$

จัดรูปสมการ (32) ใหม่ จะได้

$$2t \cos [(\theta_1 + \theta_2)/2] \sin [(\theta_1 - \theta_2)/2] = \lambda \quad (33)$$



ภาพที่ 17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกที่มีความหนา (ก) จำกัด (ข) ไม่จำกัด จากภาพที่ 16 ได้ $(\theta_1 + \theta_2)/2 = \theta_B$ และ $(\theta_1 - \theta_2)/2$ มีค่าน้อย ดังนั้น

$$\sin (\theta_1 - \theta_2)/2 \approx (\theta_1 - \theta_2)/2 = B/2 \quad (34)$$

หรือ
$$B = (2\theta_1 - 2\theta_2) / 2 = \theta_1 - \theta_2 \quad (35)$$

โดย B เป็นความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum; FWHM) ของพีค

จะได้สมการ (33) เป็น

$$t B \cos \theta_B = \lambda$$

หรือ
$$t = \lambda / B \cos \theta_B \quad (36)$$

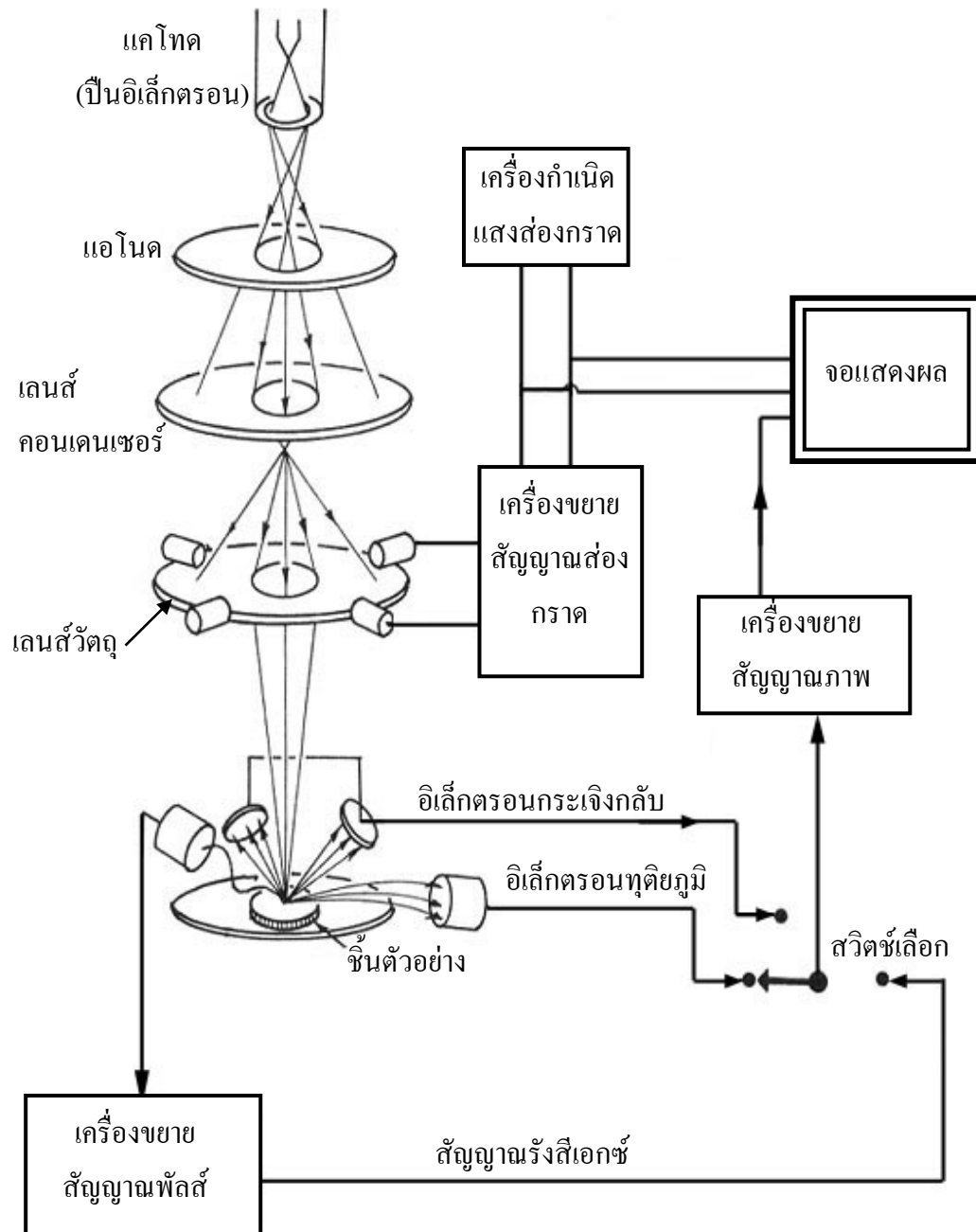
ในกรณีผลึกกลมที่มีรัศมี t จะสามารถหาขนาดเกรน (D_{hkl}) ที่ระนาบ ($h k l$) ได้จากสมการ เซอร์เรอร์

$$D_{hkl} = \frac{0.9 \lambda}{B \cos \theta_B} \quad (37)$$

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ศึกษา สัณฐานวิทยา (morphology) หรือ โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของสารตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและ เซลล์ พื้นผิวน้ำตัดของโลหะและวัสดุ โดยใช้คลื่นอิเล็กตรอนแทนคลื่นแสง และสามารถบีบลำ อิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ จึงได้ภาพที่มีสนามความลึก (depth of field) สูง และมีความละเอียดถึง 0.2 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 3 ระบบ ดัง ภาพที่ 18 ดังนี้

1. ระบบอิเล็กตรอนเชิงทัศน (electron optical system) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) เลนส์วัตถุ (objective lens) และขดลวดส่อง กราด (scan coil)



ภาพที่ 18 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปืนอิเล็กตรอนหรือแคโทด (ขั้วลบ) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหลายชนิด เช่น แคโทดที่ทำจากโลหะทั้งสแตนปลายแหลม สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 2,700 เคลวิน แคโทดที่ทำจากแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (lanthanum hexaboride, LaB₆) สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิ 1,800 เคลวิน และที่ความดันคงตัวประมาณ 10^{-6} ทอร์ แคโทดชนิดหลังสามารถให้อิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นมากกว่า และมีอายุการใช้งานนานกว่า แคโทดที่ทำจากทั้งสแตน

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ(primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วย สนามไฟฟ้าไปยังแอโนด กลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์เพื่อทำให้เป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดลำอิเล็กตรอนให้ใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ โดยลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กมีความเข้มของลำอิเล็กตรอนสูง จึงทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดมาก หลังจากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้ตกบนผิวชิ้นตัวอย่าง โดยมีหน่วยควบคุม (control unit) ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กจากขดลวดส่องกราดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของ ลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในแนวระดับ

2. ระบบควบคุมความดันและสุญญากาศ(control pressure and vacuum system) เพื่อให้ภายในคอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีสภาพเป็นสุญญากาศ โดยควบคุมให้บริเวณด้านบนมีความดันอยู่ในช่วง $10^{-6} - 10^{-8}$ ทอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนถูกอะตอม จากก๊าซ ต่างๆ ดูดกลืนหรือกระเจิงกลับ(back scatter)

3. ระบบแปลโคจรภาพและบันทึกภาพ(image translating and photo recording) ประกอบด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน(electron signal detector) ซึ่งจะเลือกรับสัญญาณที่ต้องการแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณภาพ เมื่อนำไปขยายสัญญาณภาพด้วยเครื่องขยายวิดีโอ (video amplifier) แล้วจึงแปลงสัญญาณภาพเป็นภาพบนจอของหลอดรังสีแคโทด หรือจอคอมพิวเตอร์ ตัวตรวจวัดสัญญาณสามารถตรวจวัดสัญญาณ 3 ชนิดดังนี้

3.1 สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เป็นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนปฐม ภูมิพลังงานสูงตกกระทบบอะตอมที่ผิวของสารตัวอย่าง แล้วถ่ายโอนพลังงานให้กับอะตอมของสาร ตัวอย่าง ทำให้อะตอมของสารตัวอย่างปลดปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา

อิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนมากเกิดที่บริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่างที่ความลึกไม่เกิน 10 นาโนเมตร นิยมใช้หัววัดรังสีชนิดพลาสติกเรืองแสงกึ่งตัวนำ ในการตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

3.2 สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ(back-scattered electron) เป็นสัญญาณที่เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่สูญเสียพลังงานเล็กน้อยให้กับอะตอมของสารตัวอย่างที่ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมสูง แล้วเกิดการกระเจิงกลับ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับจึงมีพลังงานสูงใกล้เคียงกับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ นิยมใช้หัววัดรังสีไดโอดสถานะของแข็ง(solid-state diode) เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณ

3.3 สัญญาณรังสีเอกซ์ เป็นสัญญาณที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจร K, L หรือ M ของอะตอมสารตัวอย่างที่ถูกกระตุ้น รังสีเอกซ์นี้มีความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งขึ้นกับอะตอมในแต่ละธาตุ จึงสามารถใช้สัญญาณอิเล็กตรอนชนิดนี้วิเคราะห์ข้อมูลของธาตุองค์ประกอบ (ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค energy dispersive x-ray spectroscopy ,EDS) นิยมใช้หัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำประเภท Si(Li) เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณ

การวัดความต้านทานด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

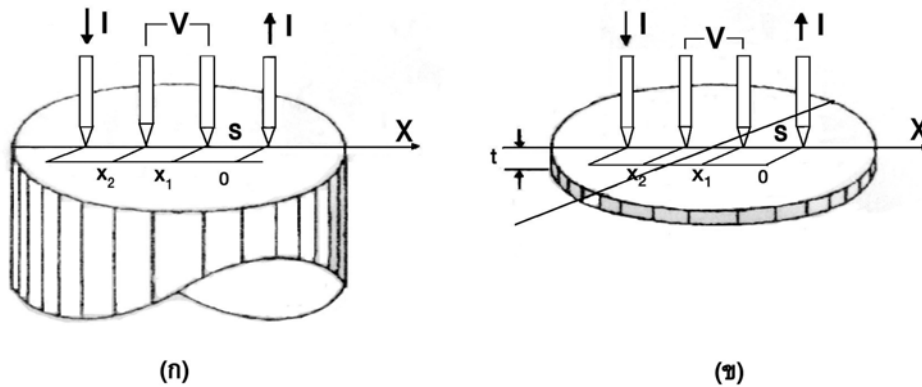
วิธีหัววัดสี่จุดเป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านของวัสดุมานานมากกว่า 70ปี ซึ่งเป็นวิธีที่ดี ไม่ทำลายผิวสารตัวอย่าง โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำเข้าระหว่างหัววัดที่ 1 และหัววัดที่ 4 แล้วใช้เครื่องวัดความต่างศักย์ที่มีความละเอียดสูง วัดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างหัววัดคู่ที่อยู่ตรงกลาง ดังภาพที่ 19 วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ

1. ขั้วไฟฟ้าทั้งสองต้องทำจากโลหะที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และมีพื้นที่หน้าตัดบริเวณสัมผัสผิวสารตัวอย่างเท่ากัน
2. สารตัวอย่างต้องมีผิวที่สม่ำเสมอ และการกระจายของกระแสไฟฟ้าต้องเป็นลักษณะครึ่งทรงกลม (semi sphere) ตามหลักไฟฟ้าสถิต

ในกรณีของวัสดุที่มีความหนา (h) มากกว่าระยะระหว่างขา (s) ของหัววัด ($h \gg s$) ดังภาพที่ 19 (ก) จะได้ความต้านทาน R เป็น

$$dR = \rho \left(\frac{dx}{A} \right) \quad (38)$$

โดย ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ
 dx เป็นระยะเล็ก ๆ ระหว่างขาของหัววัด
 และ A เป็นพื้นที่หน้าตัดระหว่างขาคู่ที่อยู่ตรงกลาง



ภาพที่ 19 วิธีหัววัดสี่จุดสำหรับสารตัวอย่าง (ก) มีความหนามาก และ(ข) มีความหนาน้อย

เมื่ออินทิเกรตสมการ (38) จะได้

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} = \frac{1}{2s} \frac{\rho}{2\pi} \quad (39)$$

เนื่องจากขั้วไฟฟ้าทั้งสองอยู่ห่างกันไม่มาก จึงเกิดการซ้อนทับของกระแสไฟฟ้า (superposition of current) ของหัววัดคู่ที่อยู่ด้านนอก จะได้

$$R = V/2I \quad (40)$$

เมื่อแทนค่า R ในสมการ (39) จะได้สภาพต้านทานของวัสดุเป็น

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I} \right) \quad (41)$$

กระแสไฟฟ้า I ที่จ่ายเข้าไปในสารตัวอย่าง ควรมีค่าน้อยที่สุดไม่ควรเกิน $2\pi s$ mA

ในกรณีของวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าระยะระหว่างขาของหัววัด ($h < s$) ดังภาพที่ 19(ข) จากสมการ (38) จะได้ความต้านทานดังนี้

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xh} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho}{2\pi h} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln(x) \Big|_s^{2s} \quad (42)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi h} \ln 2 \quad (43)$$

เมื่อแทนค่า R จากสมการ (40) ในสมการ (43) จะได้สภาพต้านทานของวัสดุเป็น

$$\rho = \frac{\pi h}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (44)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุที่ใช้เตรียมฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางนิกเกิล เพื่อนำมาใช้ในการวิจัยนี้มีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุ	ขนาด	สูตรทางเคมี	บริษัทที่ผลิต	ความบริสุทธิ์
นิกเกิลแบบผง	—	Ni	Kurt J. Lesker	99.9%
นิกเกิลแบบแผ่น	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 0.250 นิ้ว		Company	99.9%
แผ่นกระจกสไลด์	1×3 นิ้ว	SiO ₂	Sail Brand, China	—

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิตอล
2. เมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol)
3. ที่ตัดกระจก
4. ถังมือยาง
5. เครื่องซั่งอย่างละเอียด รุ่น AC 2105 จอแสดงผลแบบ black graphic LCD ตั้งภาพที่ 20 ผลิตโดยบริษัท SATORIUS GMBH GOTTINGEN ประเทศเยอรมัน ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 230 กรัม ความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม ความต่าศักย์ 220 โวลต์ 50 Hz



ภาพที่ 20 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

6. เตาเผาความร้อนสูง รุ่น 2-525 ดังภาพที่ 21 ผลิตโดยบริษัท NEY ประเทศสหรัฐอเมริกา กำลังไฟฟ้า 1500 วัตต์ 1 เฟส กระแสสูงสุด 6.8 แอมแปร์ ขอบเขตอุณหภูมิ 100°C - 1100°C ความแม่นยำอุณหภูมิ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0°C - $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$



ภาพที่ 21 เตาเผาความร้อนสูง

7. เครื่องเคลือบฟิล์ม รุ่น UNIVEX 300 ผลิตโดยบริษัท LEYBOLD- HERAEUS GMBH GOTTINGEN ประเทศเยอรมัน สามารถเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีซีสปีเตอร์ริง และ วิธีอาร์เอฟสปีเตอร์ริง ประกอบด้วย

7.1 ภาชนะสุญญากาศ เกจวัดความดัน และ ตัวควบคุมการไหลของก๊าซ (gas flow controller) ดังภาพที่ 22 (ก)

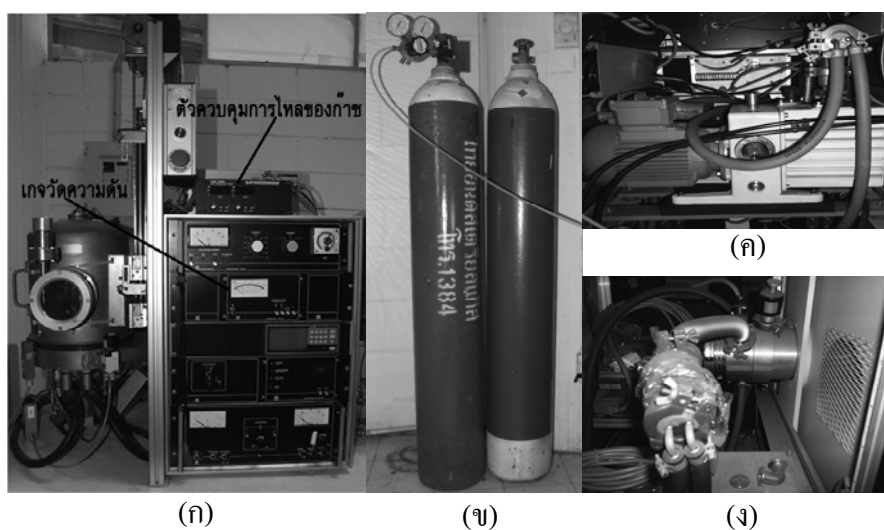
7.2 ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน ดังภาพที่ 22 (ข)

7.3 โรตารีปั๊ม ดังภาพที่ 22 (ค)

7.4 เทอร์โบปั๊ม ดังภาพที่ 22 (ง)

7.5 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 22 (จ)

7.6 เครื่องระบายความร้อน ดังภาพที่ 22 (ฉ)



ภาพที่ 22 ส่วนประกอบของเครื่องเคลือบฟิล์มบาง (ก) ภาชนะสุญญากาศและเกจวัดความดัน (ข) ถังบรรจุก๊าซอาร์กอน (ค) โรตารีปั๊ม (ง) เทอร์โบปั๊ม (จ) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (ฉ) เครื่องระบายความร้อน

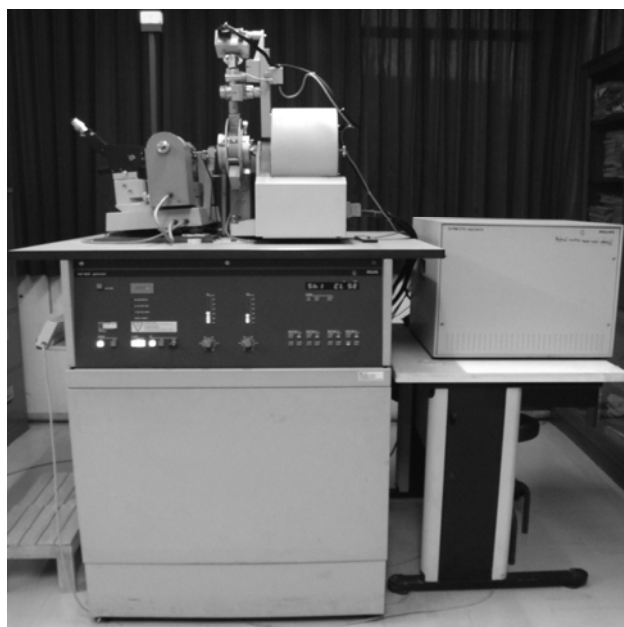
อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิทัล
2. ชุดเครื่องชั่งอย่างละเอียด รุ่น AC 2105

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง

เครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์ รุ่น PW 3710 ดังภาพที่ 23 ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์ ประกอบด้วย

- เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ Philips รุ่น 1830/40 การวิจัยนี้ใช้หลอดรังสีเอกซ์ชนิด Cu - K_{α} ความยาวคลื่นเฉลี่ย 0.1541 nm
- เครื่องบันทึกสัญญาณ Philips รุ่น PM8261
- เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 23 เครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะเกรนของสารตัวอย่าง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6480 LV ดังภาพที่ 24 ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น ความต่างศักย์ 220 VAC 50 Hz 3.0 kVA กำลังขยาย 18 – 300,000 เท่า

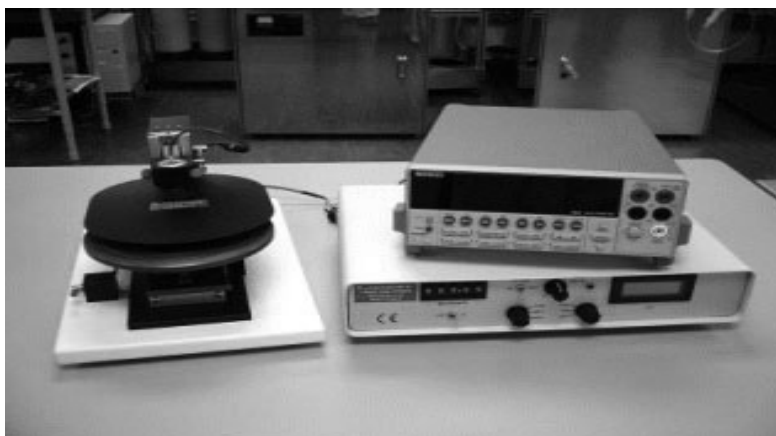


ภาพที่ 24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2. เครื่องเคลือบไอออน (Ion coater) รุ่น IB-2 ผลิตโดยบริษัท Eiko Engineer ประเทศญี่ปุ่น กระแสไอออน 5 – 8 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ 1 – 6 โวลต์

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง

1. ชุดหัววัดสี่จุด ดังภาพที่ 25 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างหัววัดเท่ากันเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร และที่วางแผ่นฟิล์มตัวอย่าง สามารถเลื่อนขึ้น – ลงได้
2. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำมาก
3. เครื่องวัดความต่างศักย์ที่มีความละเอียดสูง



ภาพที่ 25 ชุดหัววัดลึจุด

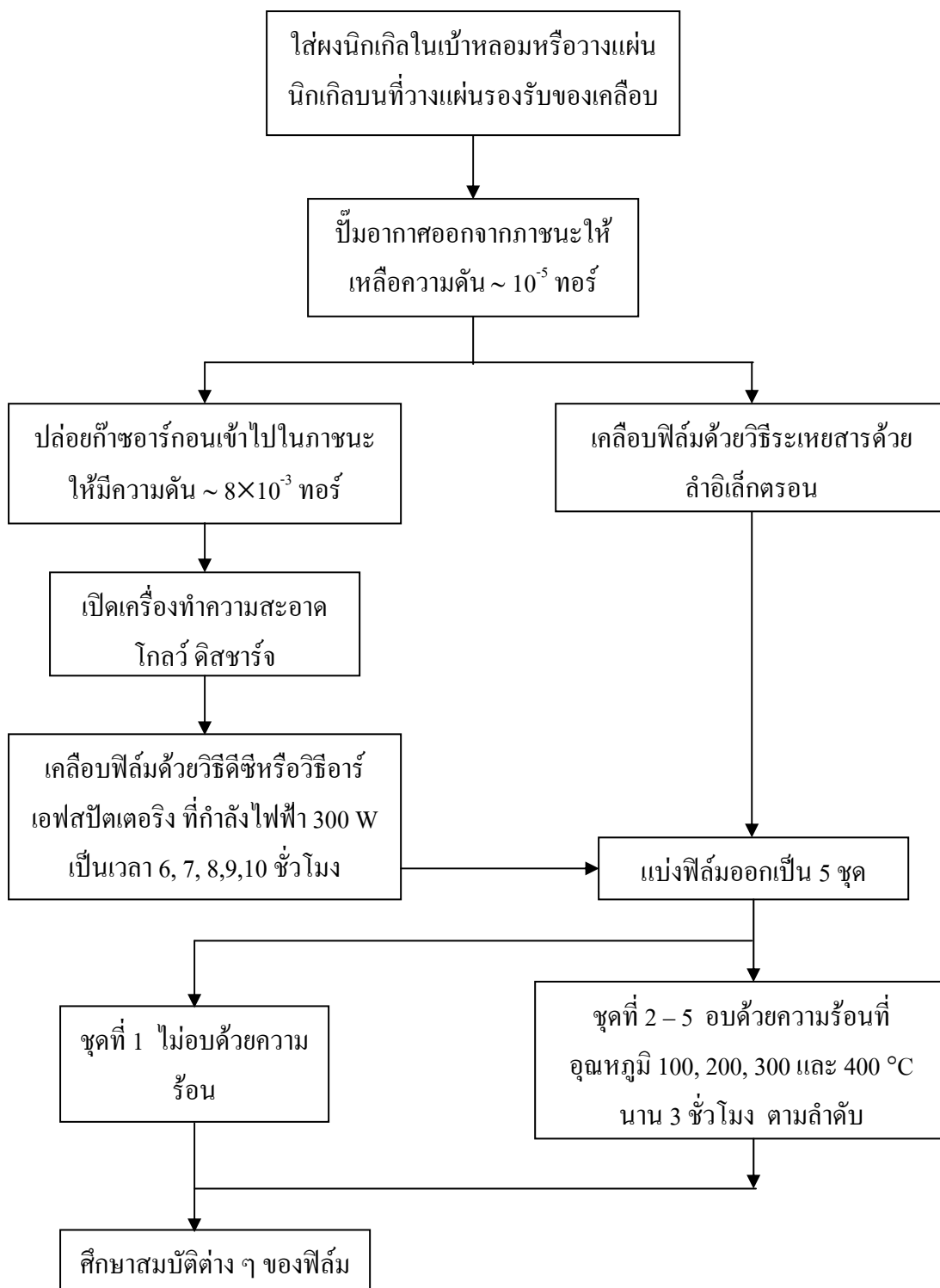
วิธีเคลือบฟิล์มและการวิเคราะห์

การเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางนิกเกิลลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีซีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน 5 ช่วง คือ 6,7,8,9 และ 10 ชั่วโมง การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนใช้ผงนิกเกิลบริสุทธิ์เป็นเป้าสารเคลือบ สำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีซีซีและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงใช้แผ่นนิกเกิลบริสุทธิ์เป็นเป้าสารเคลือบ

ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มตัวอย่างเป็นดังภาพที่ 26 ดังนี้

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำกระจกสไลด์ไปซังน้ำหนัก พร้อมทั้งวัดความกว้างและความยาว
2. วางกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้บนที่วางแผ่นรองรับของเครื่องเคลือบฟิล์ม แล้วทำการปั๊มอากาศออกจากเครื่องเคลือบฟิล์ม จนกระทั่งความดันภายในภาชนะลดลงเหลือประมาณ 10^{-5} ทอร์
3. ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าในภาชนะ จนกระทั่งความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 10^{-3} ทอร์



ภาพที่ 26 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
วิธีดีซีและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

4. ทำการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน หรือวิธีดีซี หรือ อาร์เอฟสปีดเตอริง ซึ่งมีขั้นตอนก่อนเคลือบ ดังนี้

4.1 เปิดเครื่องทำความสะอาดโกลว์ ดิสชาร์จ (glow discharge cleaning) เพื่อทำความสะอาดผิวของกระจกสไลด์อีกครั้ง

4.2 ปรับความดันภายในภาชนะ โดยลดอัตราการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะ จนกระทั่งความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 8×10^{-3} ทอร์

4.3 เคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า 300 W เป็นเวลา 6, 7, 8, 9 และ 10 ชั่วโมง

5. ชั่งน้ำหนักกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม

6. แบ่งฟิล์มตัวอย่างที่ได้ออกเป็น 5 ชุด ชุดที่ 1 ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และชุดที่ 2 – 5 ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

7. วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มตัวอย่าง

การคำนวณความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

เมื่อฟิล์มที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ จะคำนวณความหนา (h) ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม (R) ได้จากสมการ (45) และสมการ (46) ดังนี้

$$h = \frac{m_2 - m_1}{a \times b \times \rho_{Ni}} = \frac{\Delta m}{a \times b \times \rho_{Ni}} \quad (45)$$

และ

$$R = \frac{h}{t} \quad (46)$$

โดย	m_1 และ m_2	เป็น	มวลของกระจกสไลด์ก่อนเคลือบฟิล์มและหลังเคลือบฟิล์ม
	a และ b	เป็น	ความกว้างและความยาวของกระจกสไลด์
	ρ_{Ni}	เป็น	ความหนาแน่นของนิกเกิล มีค่าเท่ากับ 8.90 g/cm^3
และ	t	เป็น	เวลาที่ใช้ในการเคลือบ

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีรายละเอียดดังนี้

1. ใส่แผ่นฟิล์มตัวอย่างในเครื่องดิฟแฟรคโทมิเตอร์
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 มุมเริ่มต้น 20.00 องศา และ มุมสุดท้าย 80.00 องศา
 - 2.2 ใช้รังสีเอกซ์ชนิดส่องกวาดแบบต่อเนื่อง ความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 25 mA
 - 2.3 ใช้เป้าทองแดง ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ $\lambda_{Cu-K\alpha} = 0.1541 \text{ nm}$
 - 2.4 ช่องเล็กยาวคู่ออก 1/4 องศา ช่องเล็กยาวคู่เข้า 0.1 องศา
3. นำข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาคำนวณขนาดเกรน (D_{hkl}) ของโครงสร้างจุลภาค จากสมการ (37)

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

รายละเอียดการหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ด้วยวิธีหัววัดสี่จุด เป็นดังนี้

1. ใส่ฟิล์มตัวอย่างในเครื่องวัดความต้านทานด้วยวิธีหัววัดสี่จุด
2. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้มีค่าน้อย ๆ ระหว่างหัววัดที่ 1 และหัววัดที่ 4 แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างหัววัดที่ 2 และหัววัดที่ 3
3. ค่อย ๆ เพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งวัดความต่างศักย์ในแต่ละครั้ง
4. คำนวณหาสภาพต้านทานของฟิล์มตัวอย่างจากสมการ (43)

สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย

1. เคลือบฟิล์มตัวอย่าง ศึกษามวล ความหนา อัตราการเคลือบ และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง ที่หน่วยวิจัยและปฏิบัติการสารตัวนำยวดยิ่งและพอลิเมอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ศึกษาแลตทิซพารามิเตอร์ และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง ที่ห้องปฏิบัติการวิทยารังสีเอกซ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

3. ศึกษาเกรนของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ ศูนย์เครื่องมือส่วนกลาง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ระยะเวลาการทำวิจัย

ปีการศึกษา 2545 – ปีการศึกษา 2549

ผลและวิจารณ์

ผลการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางนิกเกิลลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีสปัตเตอร์ริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง โดยใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน 5 ช่วง คือ ใช้เวลาเคลือบฟิล์ม (t) 6 ชั่วโมง , 7 ชั่วโมง , 8 ชั่วโมง , 9 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง นำฟิล์มที่เคลือบในแต่ละวิธี มาแบ่งเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และชุดที่ 2 – 5 ผ่านการอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (T) 100, 200, 300 และ 400 °C ตามลำดับ ชื่อฟิล์มตัวอย่างและขนาดแผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้เคลือบฟิล์มด้วยวิธีทั้งสาม ได้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ tXT แทนชื่อฟิล์ม

โดย t แทนเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม
 X แทนวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม คือ E แทนวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน,
 D แทนวิธีดีซีสปัตเตอร์ริง และ R แทนวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง
 และ T เป็นตัวเลขแทนอุณหภูมิ ที่ใช้ในการอบฟิล์ม ซึ่งเลข 0 แทนฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน เลข 1,2,3 และ 4 แทนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์มที่ 100,200,300 และ 400 °C ตามลำดับ

ความกว้าง (a) ความยาว (b) และพื้นที่ (ab) ของกระจกสไลด์ก่อนการเคลือบฟิล์มได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชื่อฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยเวลา t แล้วอบที่อุณหภูมิ T และขนาด (ab) ของแผ่น
กระจกสไลด์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม ตัวอย่าง	t (h)	T (°C)	a (cm)	b (cm)	ab (cm ²)
1.1	6E0	6	-	2.542	7.573	19.251
1.2	6E1	6	100	2.536	7.566	19.187
1.3	6E2	6	200	2.551	7.533	19.217
1.4	6E3	6	300	2.542	7.561	19.220
1.5	6E4	6	400	2.535	7.535	19.101
2.1	7E0	7	-	2.538	7.642	19.395
2.2	7E1	7	100	2.543	7.633	19.411
2.3	7E2	7	200	2.547	7.641	19.462
2.4	7E3	7	300	2.548	7.635	19.454
2.5	7E4	7	400	2.543	7.648	19.449
3.1	8E0	8	-	2.547	7.651	19.487
3.2	8E1	8	100	2.529	7.645	19.334
3.3	8E2	8	200	2.537	7.643	19.390
3.4	8E3	8	300	2.534	7.646	19.375
3.5	8E4	8	400	2.542	7.635	19.408
4.1	9E0	9	-	2.531	7.644	19.347
4.2	9E1	9	100	2.527	7.648	19.326
4.3	9E2	9	200	2.532	7.643	19.352
4.4	9E3	9	300	2.529	7.645	19.334
4.5	9E4	9	400	2.533	7.634	19.337
5.1	10E0	10	-	2.529	7.613	19.253
5.2	10E1	10	100	2.527	7.615	19.243
5.3	10E2	10	200	2.531	7.611	19.263
5.4	10E3	10	300	2.528	7.605	19.225
5.5	10E4	10	400	2.53	7.602	19.241

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม ตัวอย่าง	t (h)	T (°C)	a (cm)	b (cm)	ab (cm ²)
6.1	6D0	6	-	2.542	7.573	19.251
6.2	6D1	6	100	2.536	7.566	19.187
6.3	6D2	6	200	2.551	7.533	19.217
6.4	6D3	6	300	2.542	7.561	19.220
6.5	6D4	6	400	2.535	7.535	19.101
7.1	7D0	7	-	2.538	7.642	19.395
7.2	7D1	7	100	2.543	7.633	19.411
7.3	7D2	7	200	2.547	7.641	19.462
7.4	7D3	7	300	2.548	7.635	19.454
7.5	7D4	7	400	2.543	7.648	19.449
8.1	8D0	8	-	2.547	7.651	19.487
8.2	8D1	8	100	2.529	7.645	19.334
8.3	8D2	8	200	2.537	7.643	19.390
8.4	8D3	8	300	2.534	7.646	19.375
8.5	8D4	8	400	2.542	7.635	19.408
9.1	9D0	9	-	2.531	7.644	19.347
9.2	9D1	9	100	2.527	7.648	19.326
9.3	9D2	9	200	2.532	7.643	19.352
9.4	9D3	9	300	2.529	7.645	19.334
9.5	9D4	9	400	2.533	7.634	19.337
10.1	10D0	10	-	2.529	7.613	19.253
10.2	10D1	10	100	2.527	7.615	19.243
10.3	10D2	10	200	2.531	7.611	19.263
10.4	10D3	10	300	2.528	7.605	19.225
10.5	10D4	10	400	2.53	7.602	19.241

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม ตัวอย่าง	t (h)	T (°C)	a (cm)	b (cm)	ab (cm ²)
11.1	6R0	6	-	2.545	7.571	19.523
11.2	6R1	6	100	2.546	7.576	19.288
11.3	6R2	6	200	2.548	7.569	19.286
11.4	6R3	6	300	2.549	7.561	19.273
11.5	6R4	6	400	2.548	7.555	19.250
12.1	7R0	7	-	2.545	7.64	19.444
12.2	7R1	7	100	2.543	7.643	19.436
12.3	7R2	7	200	2.545	7.644	19.454
12.4	7R3	7	300	2.546	7.638	19.446
12.5	7R4	7	400	2.541	7.645	19.464
13.1	8R0	8	-	2.543	7.645	19.441
13.2	8R1	8	100	2.526	7.647	19.316
13.3	8R2	8	200	2.522	7.648	19.311
13.4	8R3	8	300	2.524	7.648	19.304
13.5	8R4	8	400	2.545	7.636	19.434
14.1	9R0	9	-	2.529	7.645	19.334
14.2	9R1	9	100	2.525	7.647	19.309
14.3	9R2	9	200	2.533	7.648	19.372
14.4	9R3	9	300	2.528	7.648	19.334
14.5	9R4	9	400	2.531	7.636	19.327
15.1	10R0	10	-	2.528	7.614	19.248
15.2	10R1	10	100	2.528	7.616	19.253
15.3	10R2	10	200	2.526	7.614	19.233
15.4	10R3	10	300	2.527	7.608	19.225
15.5	10R4	10	400	2.529	7.605	19.233

ผลการศึกษามวล ความหนา และอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

มวลของแผ่นกระจกสไลด์ก่อนการเคลือบฟิล์ม (m_1) และมวลหลังการเคลือบฟิล์ม (m_2) มวลของฟิล์มที่เคลือบต่อพื้นที่ของแผ่นกระจกสไลด์ ($\Delta m / ab$) ก่อนการอบด้วยความร้อน ความหนา (h) ของฟิล์มและอัตราการเคลือบ (R) ที่คำนวณได้จากสมการ (45) และ (46) ตามลำดับ ได้แสดงดังตารางที่ 3 ในที่นี้ใช้ค่าความหนาแน่นของนิกเกิลเท่ากับ 8.90 g/cm^3

ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบได้แสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3 มวลของแผ่นกระจกสไลด์ ก่อนการเคลือบฟิล์ม (m_1) มวลหลังการเคลือบฟิล์ม (m_2) มวลของฟิล์มที่เคลือบ (Δm) มวลของฟิล์มที่เคลือบ ต่อพื้นที่ ($\Delta m / ab$) ความหนาของฟิล์ม (h) และอัตราการเคลือบ (R) ของฟิล์มตัวอย่าง

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m / ab$ $\times 10^{-4}(\text{g} / \text{cm}^2)$	h (μm)	R (nm/min)
1.1	6E0	5.0198	5.0318	0.0120	6.23	0.70	1.9
1.2	6E1	5.1245	5.1365	0.0120	6.25	0.70	2.0
1.3	6E2	5.0916	5.1056	0.0140	7.29	0.82	2.3
1.4	6E3	5.0836	5.0966	0.0130	6.76	0.76	2.1
1.5	6E4	5.0745	5.0865	0.0120	6.28	0.71	2.0
2.1	7E0	5.0133	5.0281	0.0148	7.63	0.86	2.0
2.2	7E1	4.9397	4.9541	0.0144	7.42	0.83	2.0
2.3	7E2	4.9865	5.0023	0.0158	8.12	0.91	2.2
2.4	7E3	4.9636	4.9775	0.0139	7.15	0.80	1.9
2.5	7E4	4.9207	4.9329	0.0122	6.27	0.70	1.7

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m / ab$ $\times 10^{-4}(\text{g} / \text{cm}^2)$	h (μm)	R (nm/min)
3.1	8E0	4.9271	4.9431	0.016	8.21	0.92	1.9
3.2	8E1	4.9329	4.9491	0.0162	8.38	0.94	2.0
3.3	8E2	5.0944	5.1093	0.0149	7.68	0.86	1.8
3.4	8E3	5.0829	5.1001	0.0172	8.88	1.00	2.1
3.5	8E4	5.1001	5.1155	0.0154	7.93	0.89	1.9
4.1	9E0	5.0992	5.1183	0.0191	9.87	1.11	2.1
4.2	9E1	5.0999	5.1185	0.0186	9.62	1.08	2.0
4.3	9E2	5.0482	5.0668	0.0186	9.61	1.08	2.0
4.4	9E3	5.0408	5.0601	0.0193	9.98	1.12	2.1
4.5	9E4	5.0347	5.0537	0.019	9.83	1.10	2.0
5.1	10E0	5.0357	5.0565	0.0208	10.8	1.21	2.0
5.2	10E1	5.0466	5.0661	0.0195	10.13	1.14	1.9
5.3	10E2	5.0479	5.0675	0.0196	10.17	1.14	1.9
5.4	10E3	5.1002	5.1206	0.0204	10.61	1.19	2.0
5.5	10E4	5.2696	5.2888	0.0192	9.98	1.12	1.9
6.1	6D0	5.0198	5.0308	0.011	5.71	0.64	1.8
6.2	6D1	5.1245	5.1355	0.011	5.73	0.64	1.8
6.3	6D2	5.0916	5.1016	0.01	5.2	0.58	1.6
6.4	6D3	5.0836	5.0936	0.01	5.2	0.58	1.6
6.5	6D4	5.0745	5.0855	0.011	5.76	0.65	1.8
7.1	7D0	5.0133	5.0258	0.0125	6.44	0.72	1.7
7.2	7D1	4.9397	4.9511	0.0114	5.87	0.66	1.6
7.3	7D2	4.9865	5.0003	0.0138	7.09	0.80	1.9
7.4	7D3	4.9636	4.9755	0.0119	6.12	0.69	1.6
7.5	7D4	4.9207	4.9331	0.0124	6.38	0.72	1.7

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m / ab$ $\times 10^{-4}(\text{g} / \text{cm}^2)$	h (μm)	R (nm/min)
8.1	8D0	4.9271	4.9381	0.011	5.64	0.63	1.3
8.2	8D1	4.9329	4.9461	0.0132	6.83	0.77	1.6
8.3	8D2	5.0944	5.1083	0.0139	7.17	0.81	1.7
8.4	8D3	5.0829	5.0951	0.0122	6.3	0.71	1.5
8.5	8D4	5.1001	5.1132	0.0131	6.75	0.76	1.6
9.1	9D0	5.0992	5.1143	0.0151	7.8	0.88	1.6
9.2	9D1	5.0999	5.1155	0.0156	8.07	0.91	1.7
9.3	9D2	5.0482	5.0638	0.0156	8.06	0.91	1.7
9.4	9D3	5.0408	5.0567	0.0159	8.22	0.92	1.7
9.5	9D4	5.0347	5.0497	0.015	7.76	0.87	1.6
10.1	10D0	5.0357	5.0535	0.0178	9.25	1.04	1.7
10.2	10D1	5.0466	5.0641	0.0175	9.09	1.02	1.7
10.3	10D2	5.0479	5.0655	0.0176	9.14	1.03	1.7
10.4	10D3	5.1002	5.1196	0.0194	10.09	1.13	1.9
10.5	10D4	5.2696	5.2858	0.0162	8.42	0.95	1.6
11.1	6R0	5.0198	5.0268	0.007	3.59	0.40	1.1
11.2	6R1	5.1245	5.1315	0.007	3.63	0.41	1.1
11.3	6R2	5.0916	5.0986	0.007	3.63	0.41	1.1
11.4	6R3	5.0836	5.0899	0.0063	3.27	0.37	1.0
11.5	6R4	5.0745	5.0815	0.007	3.64	0.41	1.1
12.1	7R0	5.0133	5.0218	0.0085	4.37	0.49	1.2
12.2	7R1	4.9397	4.9478	0.0081	4.17	0.47	1.1
12.3	7R2	4.9865	4.9945	0.008	4.11	0.46	1.1
12.4	7R3	4.9636	4.9712	0.0076	3.91	0.44	1.0
12.5	7R4	4.9207	4.9284	0.0077	3.96	0.44	1.1

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m / ab$ $\times 10^{-4}(\text{g} / \text{cm}^2)$	h (μm)	R (nm/min)
13.1	8R0	4.9271	4.9373	0.0102	5.25	0.59	1.2
13.2	8R1	4.9329	4.9427	0.0098	5.07	0.57	1.2
13.3	8R2	5.0944	5.1043	0.0099	5.13	0.58	1.2
13.4	8R3	5.0829	5.0914	0.0085	4.4	0.49	1.0
13.5	8R4	5.1001	5.1102	0.0101	5.2	0.58	1.2
14.1	9R0	5.0992	5.1103	0.0111	5.74	0.65	1.2
14.2	9R1	5.0999	5.1105	0.0106	5.49	0.62	1.1
14.3	9R2	5.0482	5.0588	0.0106	5.47	0.61	1.1
14.4	9R3	5.0408	5.0507	0.0099	5.12	0.58	1.1
14.5	9R4	5.0347	5.0447	0.01	5.17	0.58	1.1
15.1	10R0	5.0357	5.0475	0.0118	6.13	0.69	1.1
15.2	10R1	5.0466	5.0589	0.0123	6.39	0.72	1.2
15.3	10R2	5.0479	5.0585	0.0106	5.51	0.62	1.0
15.4	10R3	5.1002	5.1106	0.0104	5.41	0.61	1.0
15.5	10R4	5.2696	5.28178	0.0122	6.33	0.71	1.2

ตารางที่ 4 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (h_{Av}) และอัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย (R_{Av})

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	$(\Delta m / ab)_{av}$ $\times 10^{-4}(\text{g} / \text{cm}^2)$	h_{Av} (μm)	R_{Av} (nm/min)
1.1-1.5	6E0 – 6E4	6.56	0.74	2.0
2.1-2.5	7E0 – 7E4	7.32	0.82	2.0
3.1-3.5	8E0 – 8E4	8.22	0.92	1.9
4.1-4.5	9E0 – 9E4	9.78	1.10	2.0
5.1-5.5	10E0 – 10E4	10.34	1.16	1.9

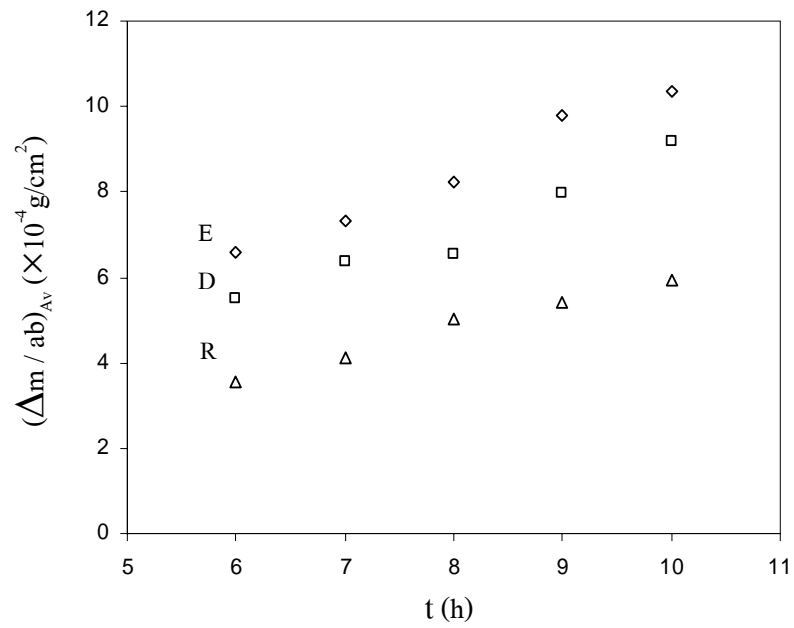
ตารางที่ 4 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	$(\Delta m / ab)_{av}$ $\times 10^{-4} (g / cm^2)$	h_{Av} (μm)	R_{Av} (nm/min)
6.1-6.5	6D0 – 6D4	5.52	0.62	1.7
7.1-7.5	7D0 – 7D4	6.38	0.72	1.7
8.1-8.5	8D0 – 8D4	6.54	0.73	1.5
9.1-9.5	9D0 – 9D4	7.98	0.90	1.7
10.1-10.5	10D0 – 10D4	9.20	1.03	1.7
11.1-11.5	6R0 – 6R4	3.55	0.40	1.1
12.1-12.5	7R0 – 7R4	4.10	0.46	1.1
13.1-13.5	8R0 – 8R4	5.01	0.56	1.2
14.1-14.5	9R0 – 9R4	5.40	0.61	1.1
15.1-15.5	10R0 – 10R4	5.95	0.67	1.1

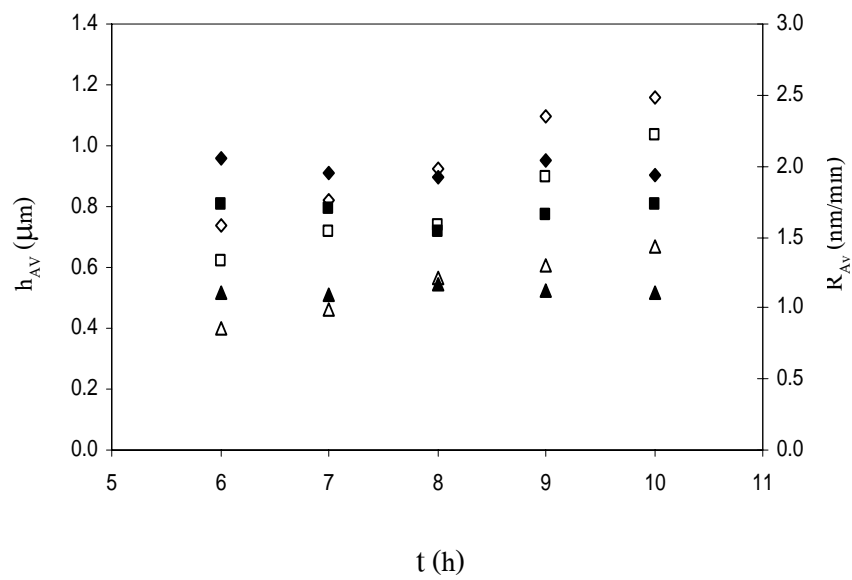
มวลของฟิล์มที่เคลือบต่อพื้นที่เฉลี่ย ($(\Delta m / ab)_{av}$) ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม (h_{Av}) และ อัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย (R_{Av}) ได้แสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 27

เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มมากขึ้น มวลและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้น โดยการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน จะเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธีดีซีสปัตเตอร์ริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง ตามลำดับ

อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าค่อนข้างคงตัว โดยไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีอัตราการเคลือบเฉลี่ยเท่ากับ 2.0 nm / min ซึ่งมากกว่า วิธีดีซีสปัตเตอร์ริง ซึ่งมีอัตราการเคลือบเฉลี่ย 1.7 nm / min และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง มีอัตราการเคลือบเฉลี่ยเท่ากับ 1.1 nm / min



(ก)



(ข)

ภาพที่ 27 (ก) มวลของฟิล์มที่เคลือบต่อพื้นที่เฉลี่ยที่เวลาเคลือบฟิล์ม t (ข) ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม และอัตราการเคลือบเฉลี่ยของฟิล์มที่เวลาเคลือบฟิล์ม t

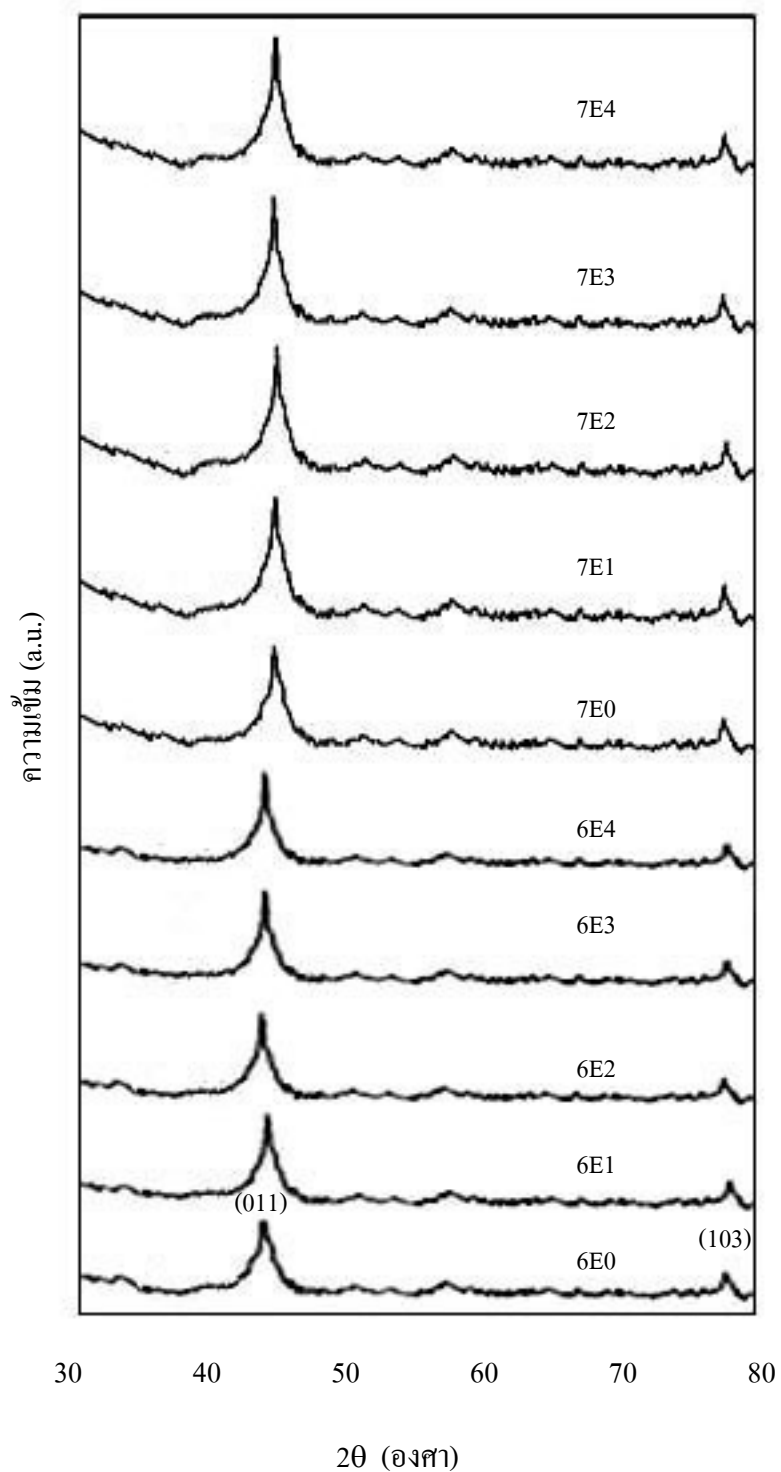
ผลการศึกษการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง

เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของฟิล์มตัวอย่างดังภาพที่ 28 – 35

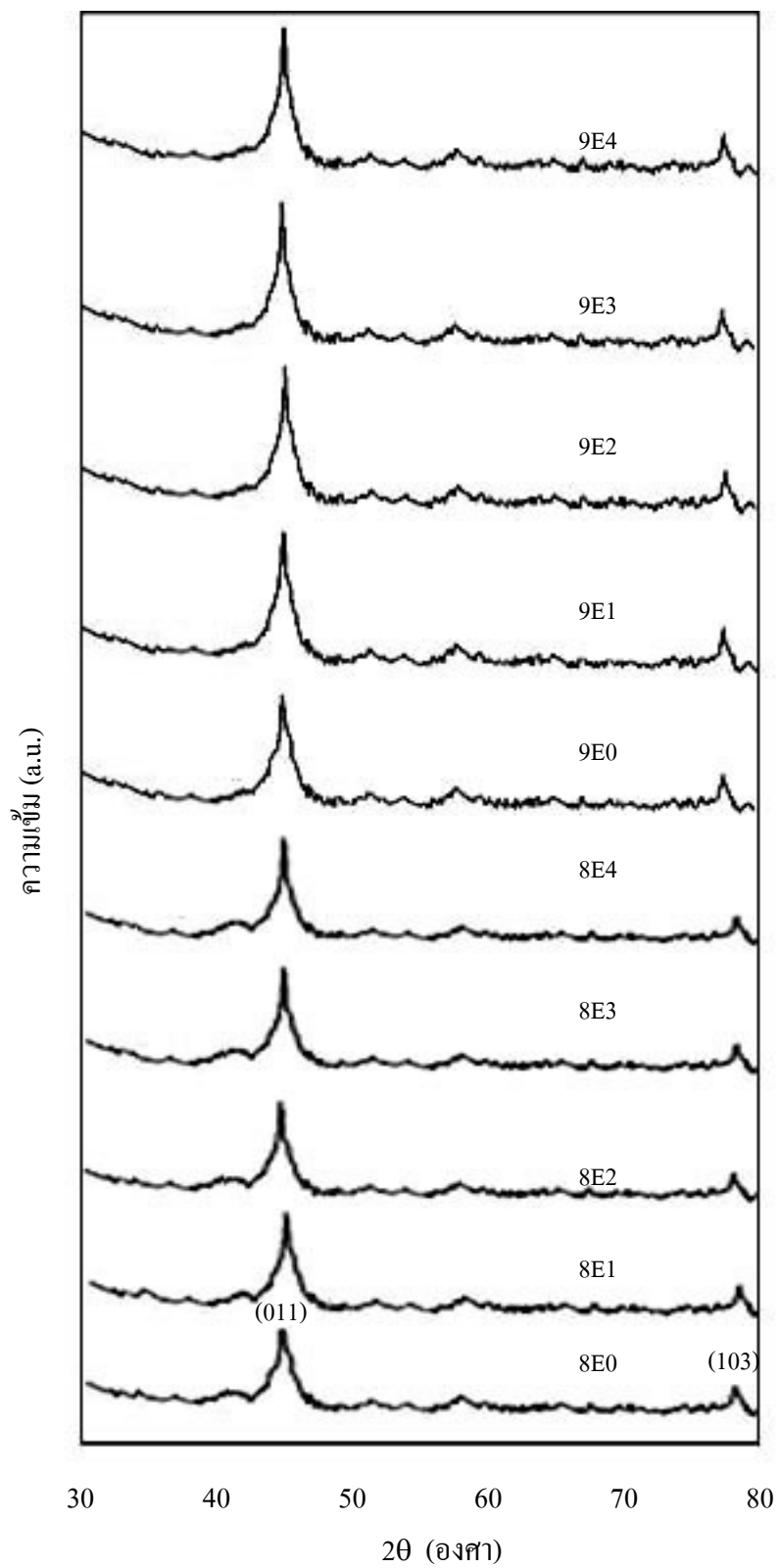
ฟิล์มตัวอย่างที่ใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้นจะมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนจากระนาบ (011) สูงขึ้น เมื่อใช้เวลาในการเคลือบและอุณหภูมิอบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ ฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากขึ้น แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่หาได้จากระนาบ (011) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง โดย $\Delta(2\theta)$ เป็นผลต่างของมุม 2θ ที่ได้จากการทดลองกับมุม $2\theta_s$ ที่ได้จากรายมาตรฐาน ดังตารางผนวกที่ ข1 (ซึ่ง $2\theta_s = 44.521$) I เป็นความเข้ม และ B เป็นความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (FWHM) ของระนาบ (011) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มตัวอย่างหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้น ค่า B จะลดลง โดย B ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อนำไปอบด้วยความร้อน

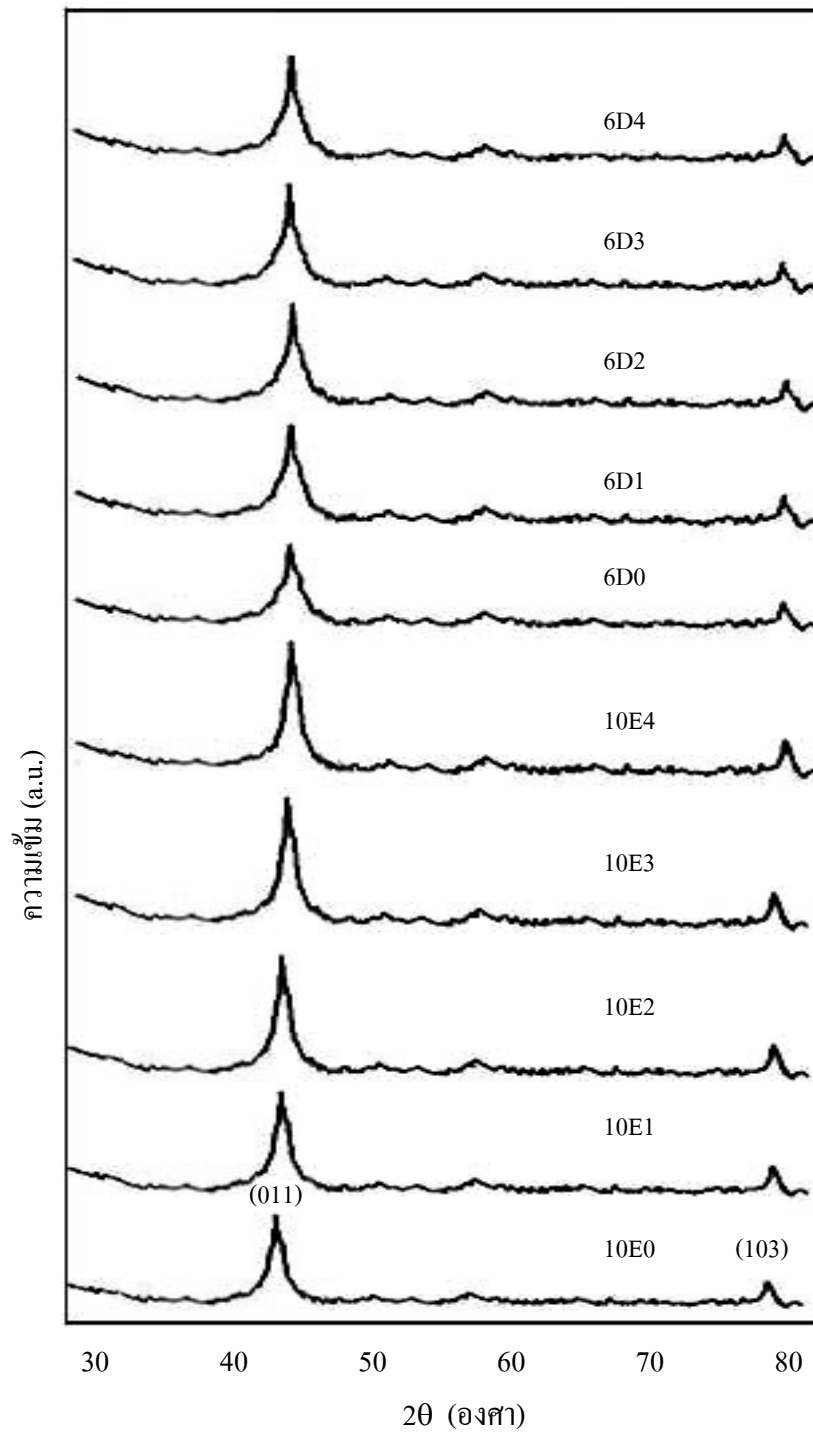
ระยะระหว่างระนาบ d_{011} ซึ่งหาได้จากสมการ (26) ซึ่งเป็นกฎของแบรกก์ ในที่นี้ใช้ค่า $\lambda_{CuK\alpha} = 0.1541$ nm a เป็นแลตทิซพารามิเตอร์ ที่คำนวณจากสมการ (27) Δa เป็นผลต่างของค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a ที่ได้จากการทดลองกับค่าพารามิเตอร์มาตรฐาน a_s ดังตารางผนวกที่ ข1 ซึ่ง $a_s = 0.4215$ nm โดยนิกเกิลมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า



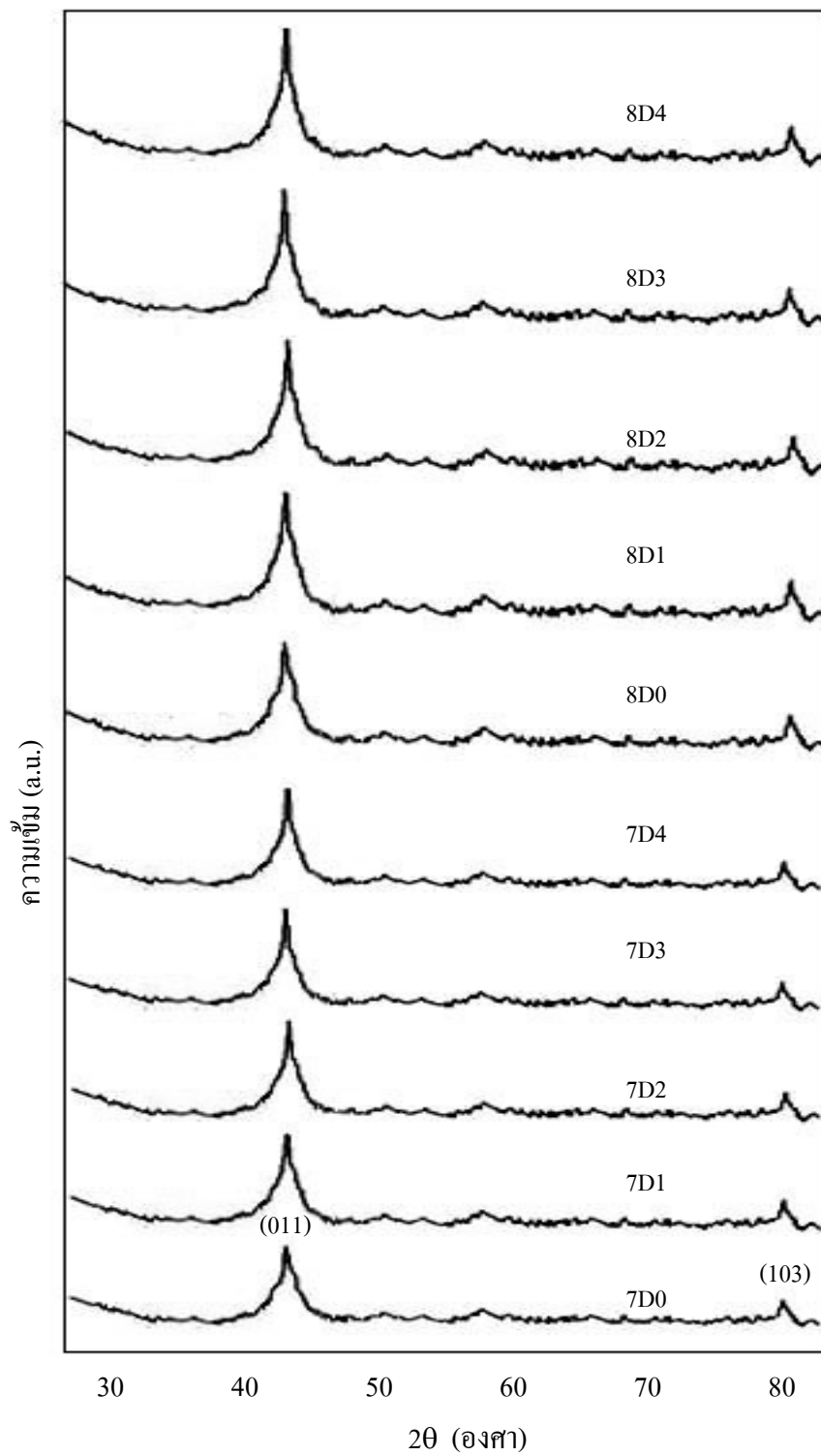
ภาพที่ 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 6 E 0 – 6 E 4 และ 7 E 0 – 7 E 4



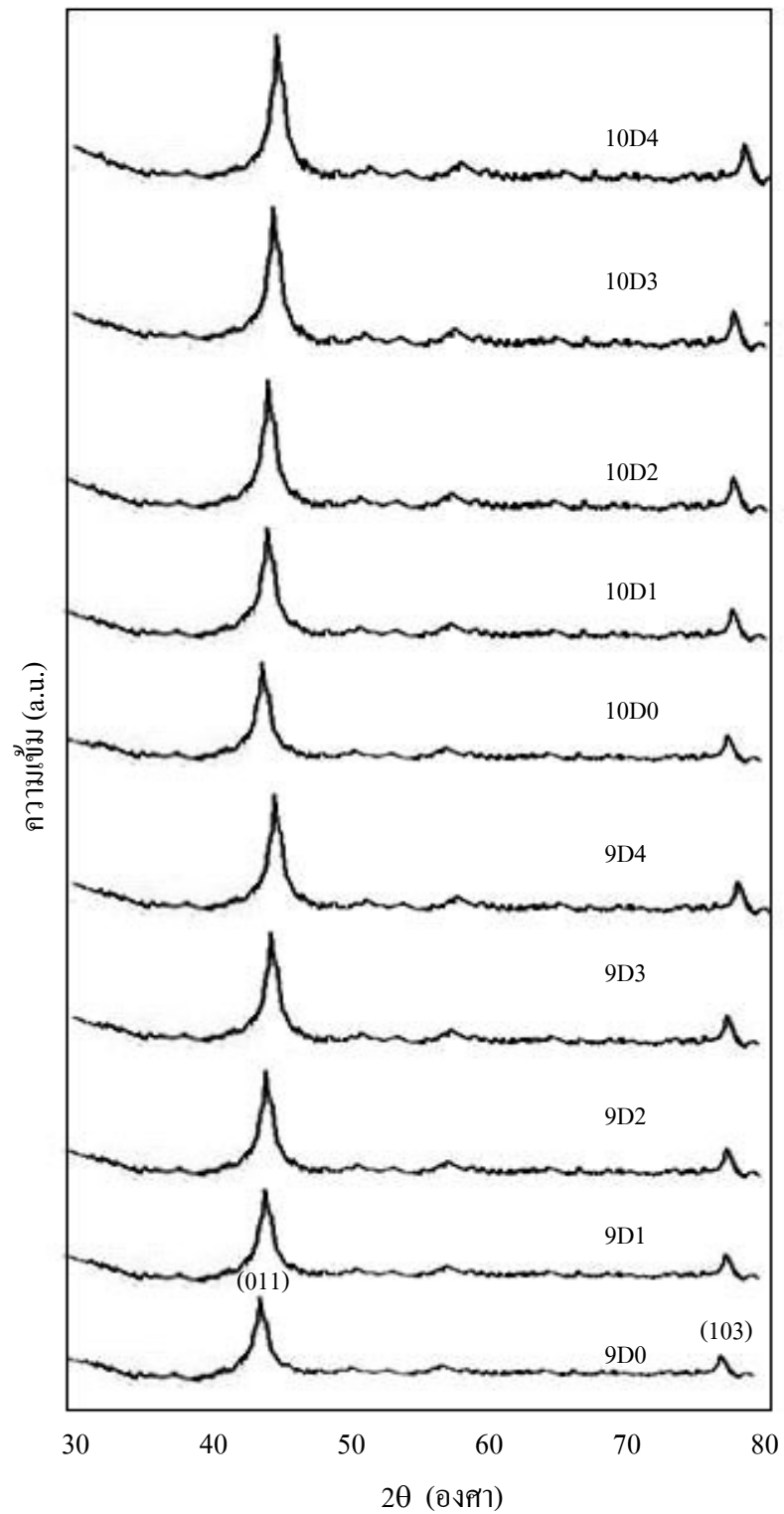
ภาพที่ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 8E 0 – 8E 4 และ 9E 0 – 9E 4



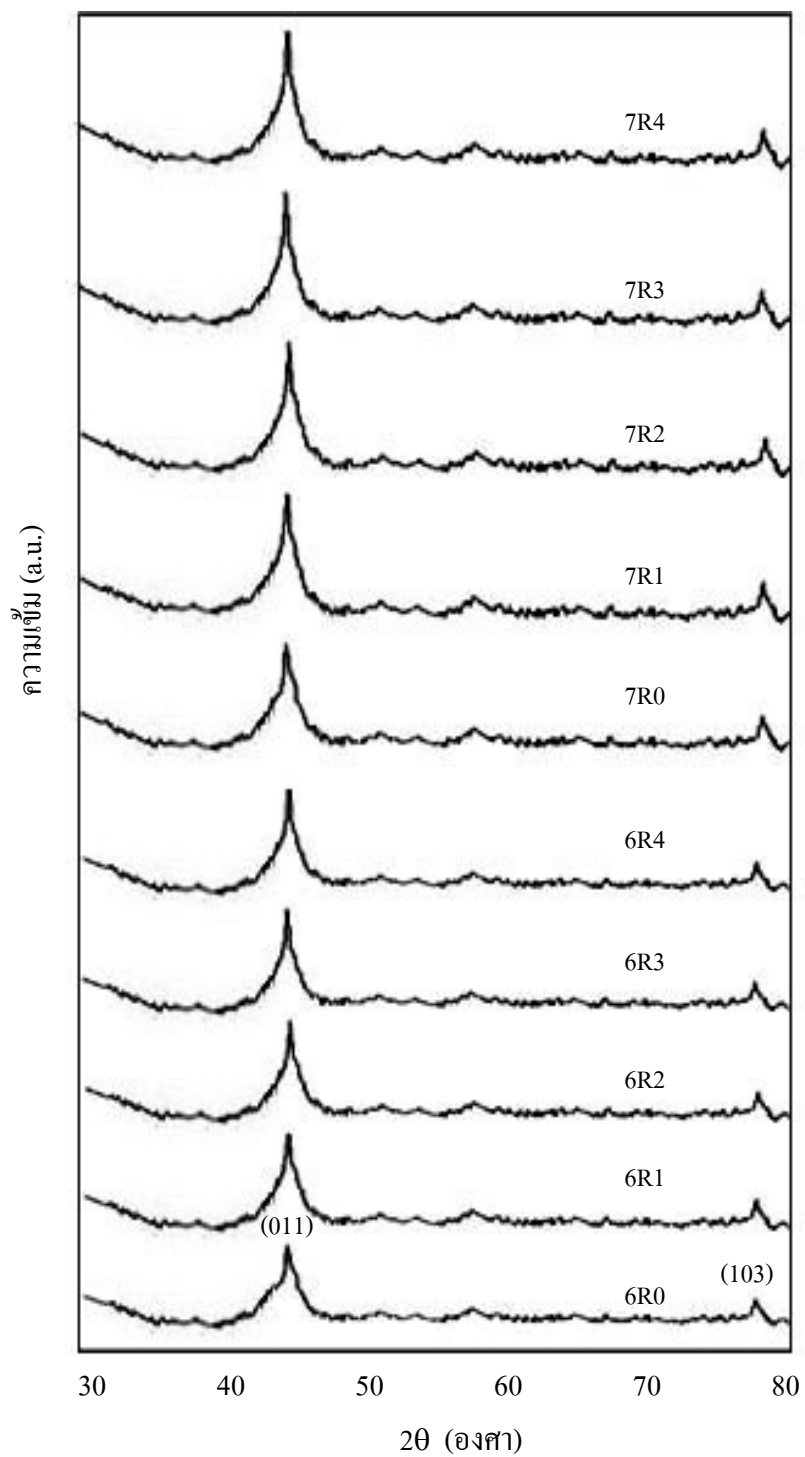
ภาพที่ 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 10E 0 – 10E 4 และ 6D 0 – 6D 4



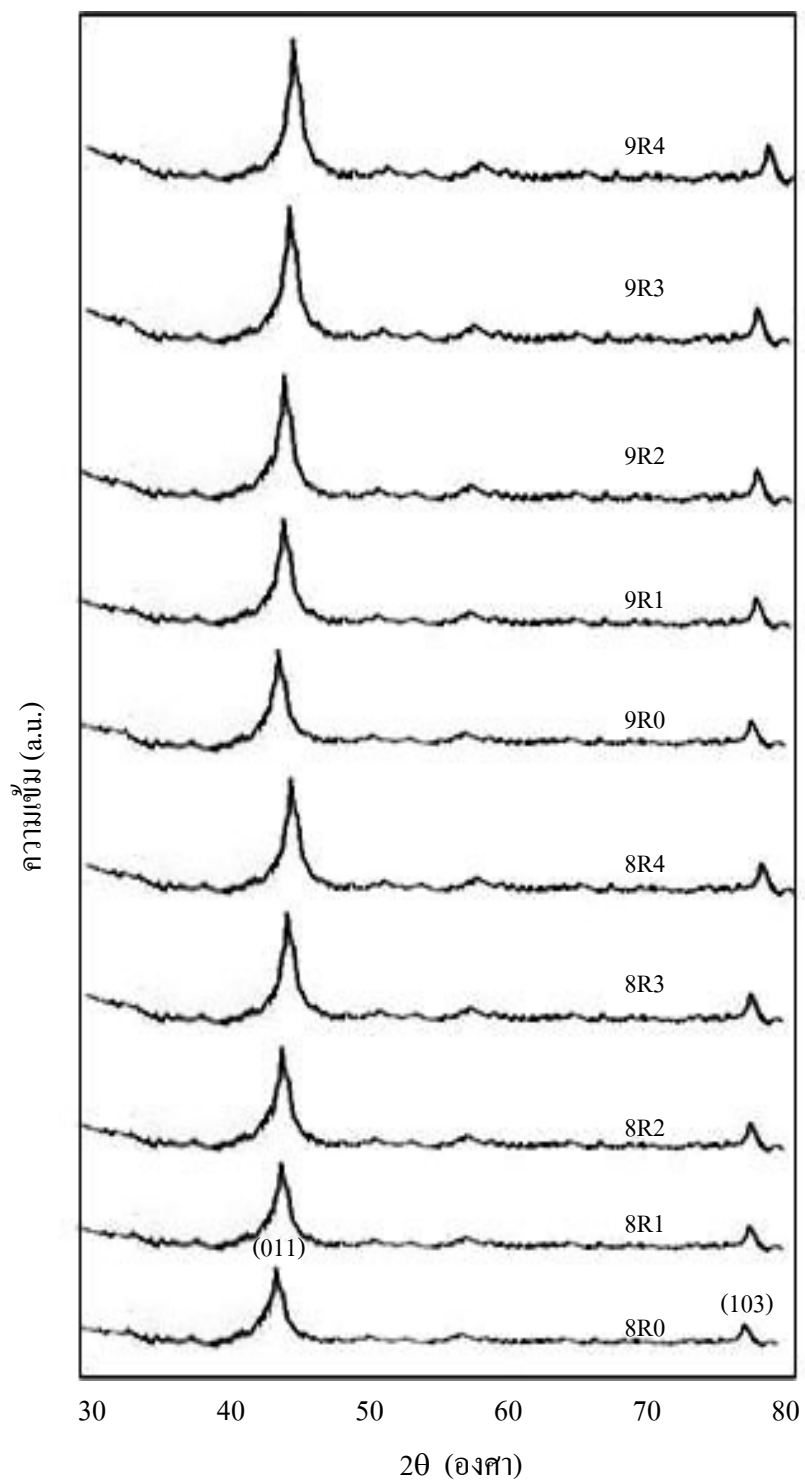
ภาพที่ 31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 7D 0 – 7D 4 และ 8D 0 – 8D 4



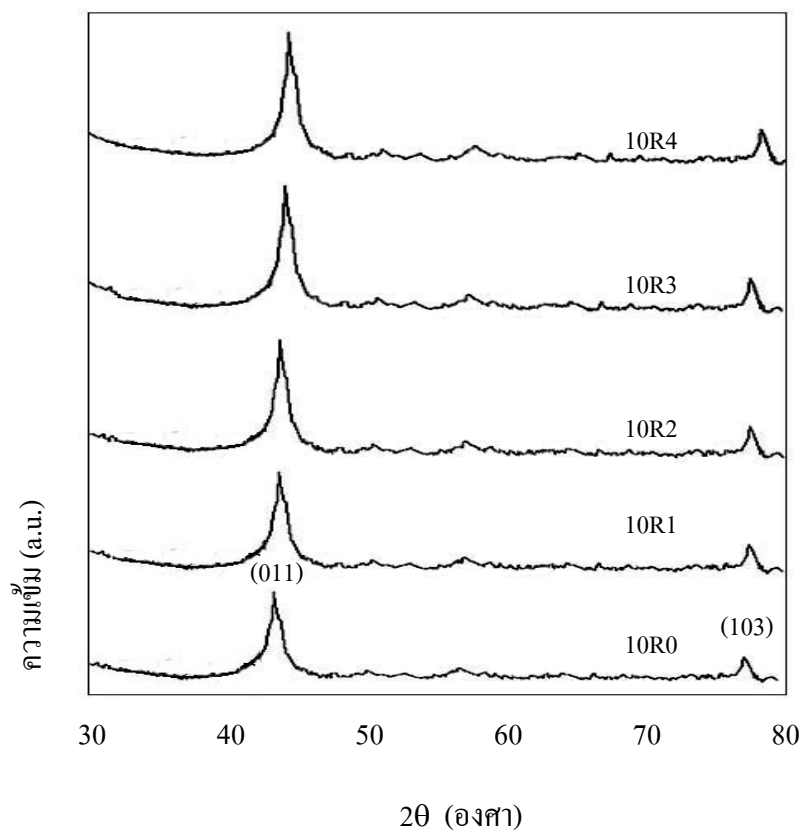
ภาพที่ 32 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 9D 0 – 9D 4 และ 10D 0 – 10D 4



ภาพที่ 33 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 6R0-6R4 และ 7R0-7R4



ภาพที่ 34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 8 R 0 – 8 R 4 และ 9 R 0 – 9 R 4



ภาพที่ 35 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 10 R 0 –10 R 4

D_{011} เป็นขนาดเกรน ของฟิล์มตัวอย่างที่คำนวณจากสมการ (37) ซึ่งจะเห็นว่าขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบฟิล์มมีค่าสูงขึ้นหรือเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มนานขึ้น และการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีขนาดเกรนใหญ่กว่าการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเทอริง ตามลำดับ

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่หาได้จากระนาบ (011) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง

ฟิล์ม	ชื่อ	มุม 2θ	$\Delta 2\theta$	I	B	d_{011}	a	Δa	D_{011}
ตัวอย่างที่	ฟิล์มตัวอย่าง	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(a.u.)	(radian)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
1.1	6E0	44.515	-0.006	62	0.0145	0.2917	0.41253	-0.0090	103.34
1.2	6E1	44.523	0.002	68	0.0132	0.2918	0.41260	-0.0089	113.34
1.3	6E2	44.527	0.006	75	0.0120	0.2918	0.41263	-0.0089	125.01
1.4	6E3	44.518	-0.003	84	0.0107	0.2917	0.41256	-0.0090	140.01
1.5	6E4	44.522	0.001	90	0.0100	0.2917	0.41259	-0.0089	150.01
2.1	7E0	44.523	0.002	67	0.0134	0.2918	0.41260	-0.0089	111.68
2.2	7E1	44.524	0.003	74	0.0121	0.2918	0.41261	-0.0089	123.35
2.3	7E2	44.525	0.004	83	0.0108	0.2918	0.41262	-0.0089	138.35
2.4	7E3	44.516	-0.005	91	0.0099	0.2917	0.41254	-0.0090	151.68
2.5	7E4	44.520	-0.001	97	0.0093	0.2917	0.41257	-0.0089	161.68
3.1	8E0	44.523	0.002	71	0.0127	0.2918	0.41260	-0.0089	118.34
3.2	8E1	44.519	-0.002	80	0.0112	0.2917	0.41256	-0.0089	133.34
3.3	8E2	44.517	-0.004	87	0.0103	0.2917	0.41255	-0.0090	145.01
3.4	8E3	44.524	0.003	94	0.0096	0.2918	0.41261	-0.0089	156.68
3.5	8E4	44.528	0.007	103	0.0087	0.2918	0.41264	-0.0089	171.69
4.1	9E0	44.509	-0.012	79	0.0114	0.2917	0.41248	-0.0090	131.67
4.2	9E1	44.517	-0.004	87	0.0103	0.2917	0.41255	-0.0090	145.01
4.3	9E2	44.524	0.003	95	0.0095	0.2918	0.41261	-0.0089	158.35
4.4	9E3	44.522	0.001	104	0.0086	0.2917	0.41259	-0.0089	173.35
4.5	9E4	44.516	-0.005	110	0.0082	0.2917	0.41254	-0.0090	183.35
5.1	10E0	44.517	-0.004	84	0.0107	0.2917	0.41255	-0.0090	140.01
5.2	10E1	44.515	-0.006	92	0.0098	0.2917	0.41253	-0.0090	153.34
5.3	10E2	44.519	-0.002	101	0.0089	0.2917	0.41256	-0.0089	168.35
5.4	10E3	44.519	-0.002	109	0.0082	0.2917	0.41256	-0.0089	181.68
5.5	10E4	44.524	0.003	117	0.0077	0.2918	0.41261	-0.0089	195.02

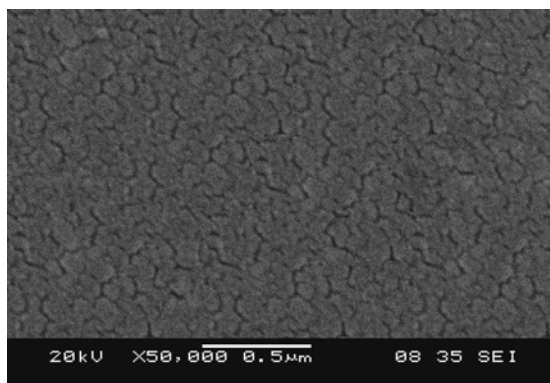
ตารางที่ 5 (ต่อ)

ฟิล์ม	ชื่อ	มุม 2θ	$\Delta 2\theta$	I	B	d_{011}	a	Δa	D_{011}
ตัวอย่างที่	ฟิล์มตัวอย่าง	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(a.u.)	(radian)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
6.1	6D0	44.517	-0.004	52	0.0173	0.2917	0.41255	-0.0090	86.67
6.2	6D1	44.520	-0.001	60	0.0150	0.2917	0.41257	-0.0089	100.01
6.3	6D2	44.525	0.004	67	0.0134	0.2918	0.41262	-0.0089	111.68
6.4	6D3	44.517	-0.004	73	0.0123	0.2917	0.41255	-0.0090	121.68
6.5	6D4	44.523	0.002	82	0.0110	0.2918	0.41260	-0.0089	136.68
7.1	7D0	44.520	-0.001	58	0.0155	0.2917	0.41257	-0.0089	96.67
7.2	7D1	44.522	0.001	64	0.0140	0.2917	0.41259	-0.0089	106.68
7.3	7D2	44.519	-0.002	70	0.0128	0.2917	0.41256	-0.0089	116.68
7.4	7D3	44.518	-0.003	78	0.0115	0.2917	0.41256	-0.0090	130.01
7.5	7D4	44.523	0.002	87	0.0103	0.2918	0.41260	-0.0089	145.01
8.1	8D0	44.520	-0.001	62	0.0145	0.2917	0.41257	-0.0089	103.34
8.2	8D1	44.517	-0.004	68	0.0132	0.2917	0.41255	-0.0090	113.34
8.3	8D2	44.519	-0.002	75	0.0120	0.2917	0.41256	-0.0089	125.01
8.4	8D3	44.521	0	83	0.0108	0.2917	0.41258	-0.0089	138.35
8.5	8D4	44.525	0.004	91	0.0099	0.2918	0.41262	-0.0089	151.68
9.1	9D0	44.519	-0.002	67	0.0134	0.2917	0.41256	-0.0089	111.68
9.2	9D1	44.515	-0.006	72	0.0125	0.2917	0.41253	-0.0090	120.01
9.3	9D2	44.520	-0.001	81	0.0111	0.2917	0.41257	-0.0089	135.01
9.4	9D3	44.525	0.004	89	0.0101	0.2918	0.41262	-0.0089	148.35
9.5	9D4	44.518	-0.003	95	0.0095	0.2917	0.41256	-0.0090	158.35
10.1	10D0	44.518	-0.003	72	0.0125	0.2917	0.41256	-0.0090	120.01
10.2	10D1	44.517	-0.004	80	0.0112	0.2917	0.41255	-0.0090	133.34
10.3	10D2	44.520	-0.001	88	0.0102	0.2917	0.41257	-0.0089	146.68
10.4	10D3	44.516	-0.005	93	0.0097	0.2917	0.41254	-0.0090	155.01
10.5	10D4	44.522	0.001	101	0.0089	0.2917	0.41259	-0.0089	168.35

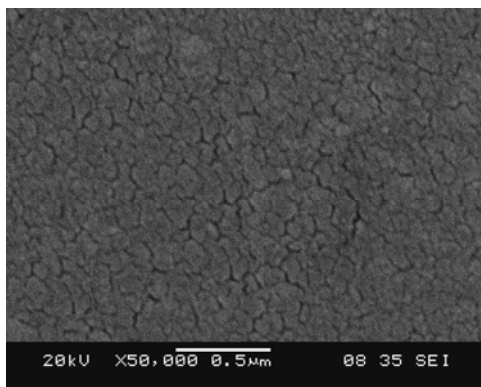
ตารางที่ 5 (ต่อ)

ฟิล์ม	ชื่อ	มุม 2θ	$\Delta 2\theta$	I	B	d_{011}	a	Δa	D_{011}
ตัวอย่างที่	ฟิล์มตัวอย่าง	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(a.u.)	(radian)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
11.1	6R0	44.525	0.004	35	0.0257	0.2918	0.41262	-0.0089	58.34
11.2	6R1	44.521	0.000	37	0.0243	0.2917	0.41258	-0.0089	61.67
11.3	6R2	44.522	0.001	40	0.0225	0.2917	0.41259	-0.0089	66.67
11.4	6R3	44.519	-0.002	45	0.0200	0.2917	0.41256	-0.0089	75.01
11.5	6R4	44.523	0.002	51	0.0176	0.2918	0.41260	-0.0089	85.01
12.1	7R0	44.520	-0.001	38	0.0237	0.2917	0.41257	-0.0089	63.34
12.2	7R1	44.522	0.001	43	0.0209	0.2917	0.41259	-0.0089	71.67
12.3	7R2	44.521	0.000	47	0.0191	0.2917	0.41258	-0.0089	78.34
12.4	7R3	44.518	-0.003	52	0.0173	0.2917	0.41256	-0.0090	86.67
12.5	7R4	44.519	-0.002	55	0.0163	0.2917	0.41256	-0.0089	91.67
13.1	8R0	44.522	0.001	41	0.0219	0.2917	0.41259	-0.0089	68.34
13.2	8R1	44.519	-0.002	45	0.0200	0.2917	0.41256	-0.0089	75.01
13.3	8R2	44.518	-0.003	49	0.0183	0.2917	0.41256	-0.0090	81.67
13.4	8R3	44.523	0.002	54	0.0166	0.2918	0.41260	-0.0089	90.01
13.5	8R4	44.522	0.001	58	0.0155	0.2917	0.41259	-0.0089	96.68
14.1	9R0	44.511	-0.001	46	0.0195	0.2917	0.41249	-0.0090	76.67
14.2	9R1	44.518	-0.003	50	0.0180	0.2917	0.41256	-0.0090	83.34
14.3	9R2	44.520	-0.001	53	0.0170	0.2917	0.41257	-0.0089	88.34
14.4	9R3	44.523	0.002	57	0.0158	0.2918	0.41260	-0.0089	95.01
14.5	9R4	44.518	-0.003	61	0.0147	0.2917	0.41256	-0.0090	101.67
15.1	10R0	44.519	-0.002	50	0.0180	0.2917	0.41256	-0.0089	83.34
15.2	10R1	44.514	-0.007	57	0.0158	0.2917	0.41252	-0.0090	95.01
15.3	10R2	44.517	-0.004	57	0.0158	0.2917	0.41255	-0.0090	95.01
15.4	10R3	44.522	0.001	60	0.0150	0.2917	0.41259	-0.0089	100.01
15.5	10R4	44.523	0.002	66	0.0136	0.2918	0.41260	-0.0089	110.01

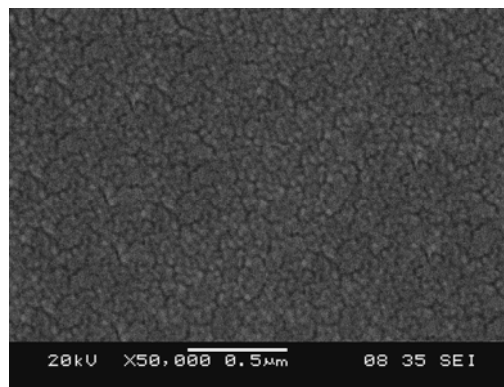
ผลการศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



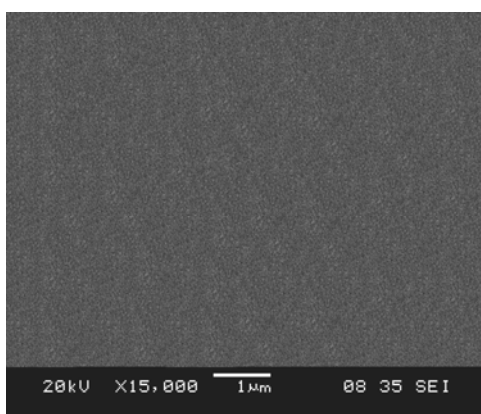
(ก)6E2



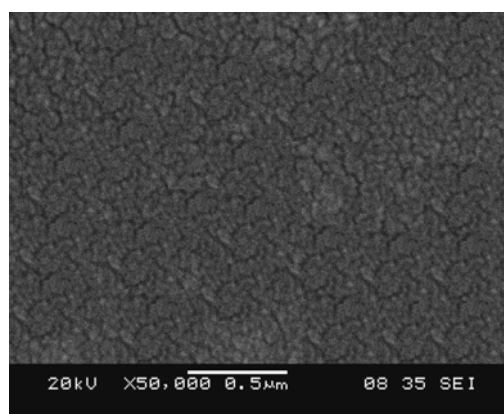
(ข)6D2



(ค)6R2



(ง)6R0



(จ)6R4

ภาพที่ 36 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มตัวอย่าง

ผลการศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 36 พบว่า ฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบ

ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีหัววัดสี่จุด โดยให้กระแสไฟฟ้า $I = 0.1, 0.2, \dots, 0.9 \text{ mA}$ เมื่อทำการวัดความต่างศักย์ของฟิล์มตัวอย่าง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 ภาพที่ 41 – 43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง จะเห็นว่าฟิล์มตัวอย่างที่ไม่ได้อบด้วยความร้อนมีความชันมากกว่าฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยความร้อน และความชันมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบมีค่าเพิ่มขึ้นหรือเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มนานขึ้น โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความชันน้อยกว่าวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างที่คำนวณได้จากสมการ (44) ได้แสดงในตารางที่ 7 โดยสภาพต้านทานไฟฟ้าแปรผันตรงกับความชันของกราฟซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ และเมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 °C มีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าได้แสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 6 ความต่างศักย์ที่วัดได้จากฟิล์มตัวอย่างที่ค่ากระแสไฟฟ้า I

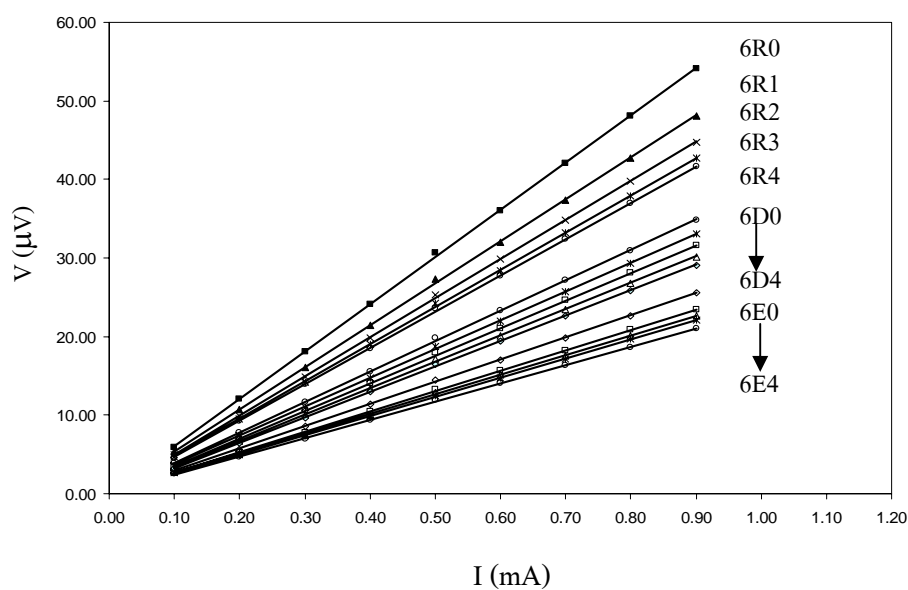
ฟิล์มตัวอย่าง \ I(mA)	ความต่างศักย์ (μV)								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
6E0	3.121	5.674	8.511	11.348	14.469	17.022	19.859	22.696	25.533
6E1	2.864	5.208	7.812	10.416	13.280	15.624	18.228	20.832	23.436
6E2	2.763	5.024	7.536	10.048	12.811	15.072	17.584	20.096	22.608
6E3	2.698	4.906	7.359	9.812	12.510	14.718	17.171	19.624	22.077
6E4	2.569	4.670	7.005	9.340	11.909	14.010	16.345	18.680	21.015
6D0	3.836	7.750	11.625	15.500	19.763	23.250	27.125	31.000	34.875
6D1	3.634	7.342	11.013	14.684	18.722	22.026	25.697	29.368	33.039
6D2	3.478	7.026	10.539	14.052	17.916	21.078	24.591	28.104	31.617
6D3	3.320	6.708	10.062	13.416	17.105	20.124	23.478	26.832	30.186
6D4	3.204	6.472	9.708	12.944	16.504	19.416	22.652	25.888	29.124
6R0	5.952	12.024	18.036	24.048	30.661	36.072	42.084	48.096	54.108
6R1	5.292	10.690	16.035	21.380	27.260	32.070	37.415	42.760	48.105
6R2	4.921	9.942	14.913	19.884	25.352	29.826	34.797	39.768	44.739
6R3	4.696	9.486	14.229	18.972	24.189	28.458	33.201	37.944	42.687
6R4	4.579	9.250	13.875	18.500	23.588	27.750	32.375	37.000	41.625
7E0	2.949	5.362	8.043	10.724	13.673	16.086	18.767	21.448	24.129
7E1	2.215	5.034	7.551	10.068	12.837	15.102	17.619	20.136	22.653
7E2	2.122	4.822	7.233	9.644	12.296	14.466	16.877	19.288	21.699
7E3	2.074	4.714	7.071	9.428	12.021	14.142	16.499	18.856	21.213
7E4	1.968	4.472	6.708	8.944	11.404	13.416	15.652	17.888	20.124
7D0	4.039	7.344	11.016	14.688	18.727	22.032	25.704	29.376	33.048
7D1	3.820	6.946	10.419	13.892	17.712	20.838	24.311	27.784	31.257
7D2	3.641	6.620	9.930	13.240	16.881	19.860	23.170	26.480	29.790
7D3	3.473	6.314	9.471	12.628	16.101	18.942	22.099	25.256	28.413
7D4	3.336	6.066	9.099	12.132	15.468	18.198	21.231	24.264	27.297
7R0	6.395	11.628	17.442	23.256	29.651	34.884	40.698	46.512	52.326
7R1	5.662	10.294	15.441	20.588	26.250	30.882	36.029	41.176	46.323
7R2	5.248	9.542	14.313	19.084	24.332	28.626	33.397	38.168	42.939
7R3	5.001	9.092	13.638	18.184	23.185	27.276	31.822	36.368	40.914
7R4	4.862	8.840	13.260	17.680	22.542	26.520	30.940	35.360	39.780

ตารางที่ 6 (ต่อ)

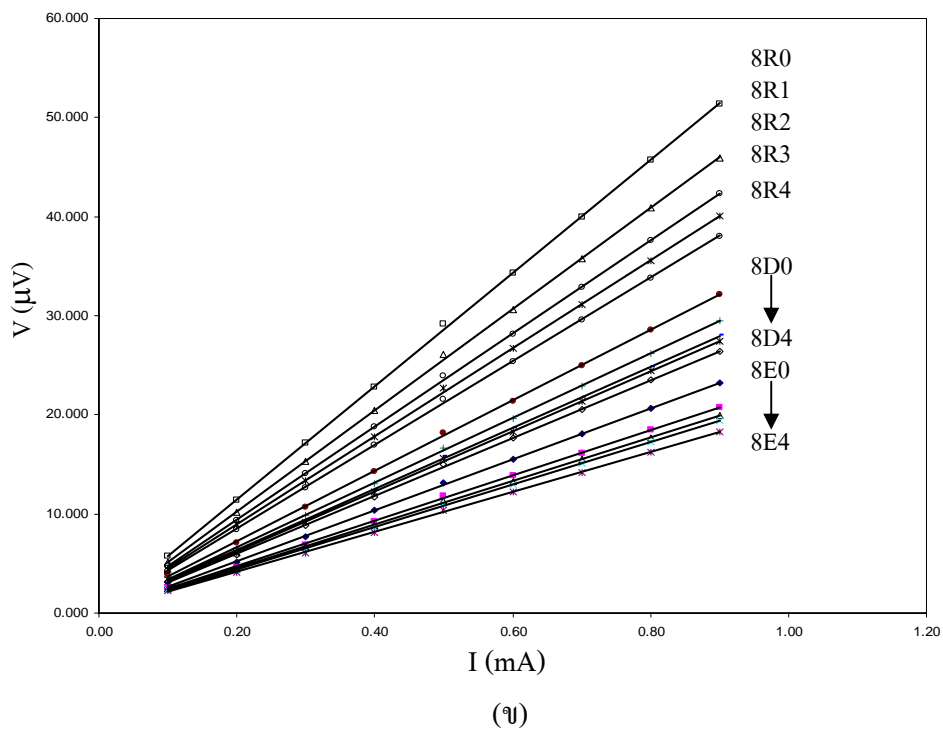
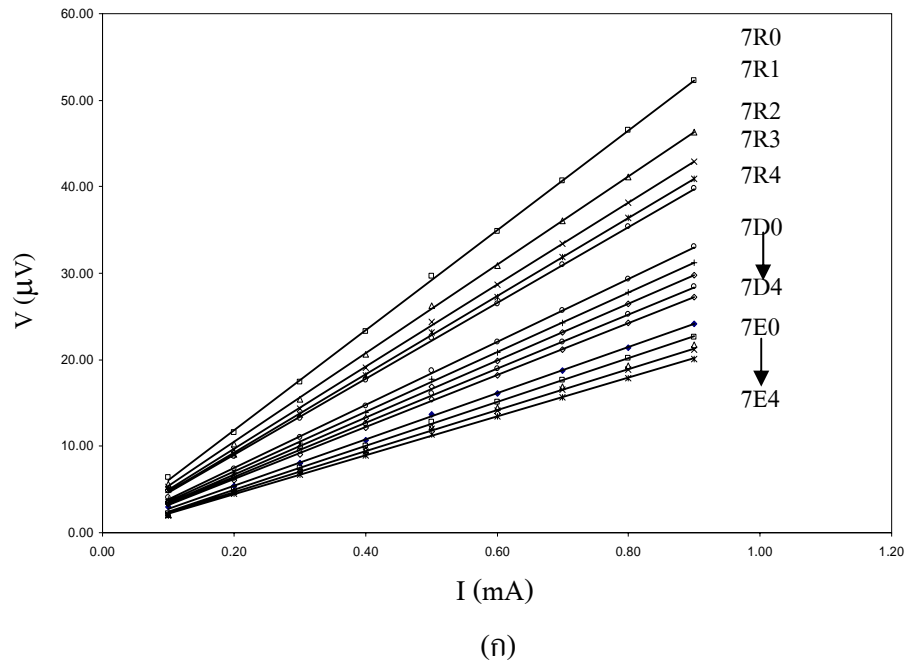
ฟิล์มตัวอย่าง	I(mA)								
	ความต่างศักย์ (μV)								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
8E0	2.841	5.166	7.749	10.332	13.173	15.498	18.081	20.664	23.247
8E1	2.538	4.614	6.921	9.228	11.766	13.842	16.149	18.456	20.763
8E2	2.434	4.426	6.639	8.852	11.286	13.278	15.491	17.704	19.917
8E3	2.374	4.316	6.474	8.632	11.006	12.948	15.106	17.264	19.422
8E4	2.234	4.062	6.093	8.124	10.358	12.186	14.217	16.248	18.279
8D0	3.927	7.140	10.710	14.280	18.207	21.420	24.990	28.560	32.130
8D1	3.600	6.546	9.819	13.092	16.692	19.638	22.911	26.184	29.457
8D2	3.422	6.222	9.333	12.444	15.866	18.666	21.777	24.888	27.999
8D3	3.357	6.104	9.156	12.208	15.565	18.312	21.364	24.416	27.468
8D4	3.233	5.878	8.817	11.756	14.989	17.634	20.573	23.512	26.451
8R0	5.712	11.424	17.136	22.848	29.131	34.272	39.984	45.696	51.408
8R1	5.108	10.216	15.324	20.432	26.051	30.648	35.756	40.864	45.972
8R2	4.700	9.400	14.100	18.800	23.970	28.200	32.900	37.600	42.300
8R3	4.447	8.894	13.341	17.788	22.680	26.682	31.129	35.576	40.023
8R4	4.228	8.456	12.684	16.912	21.563	25.368	29.596	33.824	38.052
9E0	2.732	4.968	7.452	9.936	12.668	14.904	17.388	19.872	22.356
9E1	2.259	4.610	6.915	9.220	11.756	13.830	16.135	18.440	20.745
9E2	2.075	4.234	6.351	8.468	10.797	12.702	14.819	16.936	19.053
9E3	1.969	4.018	6.027	8.036	10.246	12.054	14.063	16.072	18.081
9E4	1.874	3.824	5.736	7.648	9.751	11.472	13.384	15.296	17.208
9D0	3.396	6.930	10.395	13.860	17.672	20.790	24.255	27.720	31.185
9D1	3.149	6.426	9.639	12.852	16.386	19.278	22.491	25.704	28.917
9D2	2.996	6.114	9.171	12.228	15.591	18.342	21.399	24.456	27.513
9D3	2.842	5.800	8.700	11.600	14.790	17.400	20.300	23.200	26.100
9D4	2.774	5.662	8.493	11.324	14.438	16.986	19.817	22.648	25.479
9R0	6.073	11.042	16.563	22.084	28.157	33.126	38.647	44.168	49.689
9R1	5.624	10.226	15.339	20.452	26.076	30.678	35.791	40.904	46.017
9R2	5.091	9.256	13.884	18.512	23.603	27.768	32.396	37.024	41.652
9R3	4.665	8.482	12.723	16.964	21.629	25.446	29.687	33.928	38.169
9R4	4.519	8.216	12.324	16.432	20.951	24.648	28.756	32.864	36.972

ตารางที่ 6 (ต่อ)

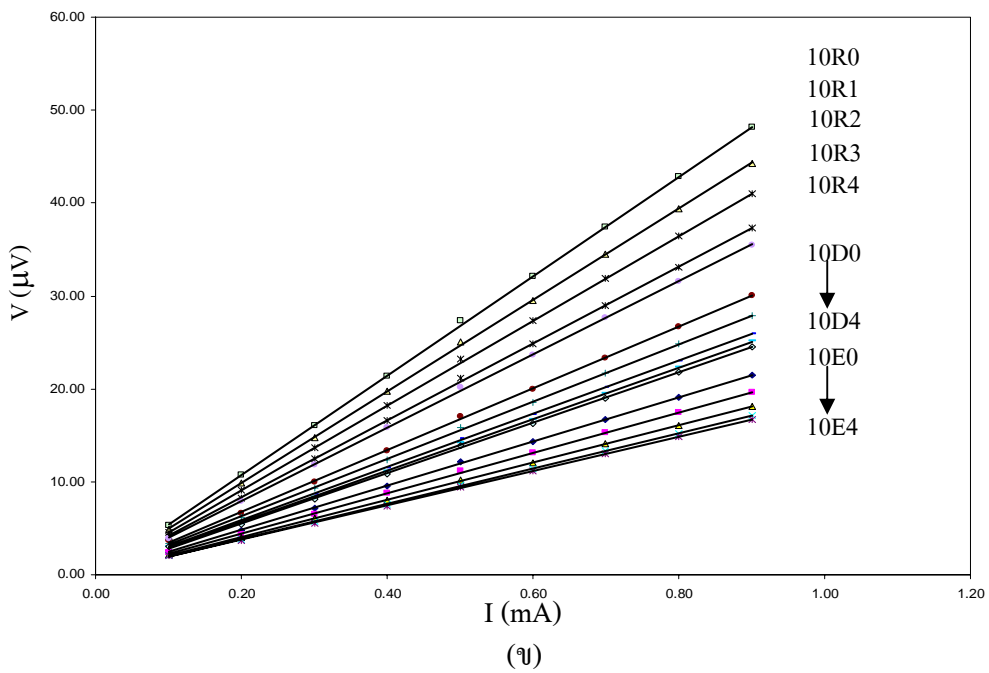
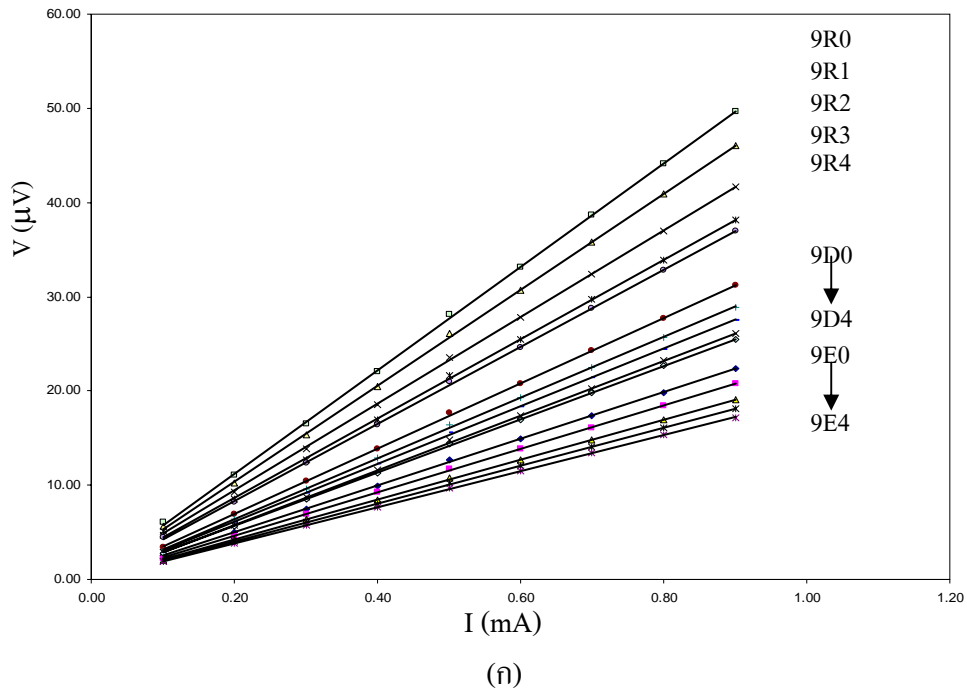
ฟิล์มตัวอย่าง \ I(mA)	ความต่างศักย์ (μV)								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10E0	2.628	4.778	7.167	9.556	12.184	14.334	16.723	19.112	21.501
10E1	2.402	4.368	6.552	8.736	11.138	13.104	15.288	17.472	19.656
10E2	2.211	4.020	6.030	8.040	10.251	12.060	14.070	16.080	18.090
10E3	2.093	3.806	5.709	7.612	9.705	11.418	13.321	15.224	17.127
10E4	2.043	3.714	5.571	7.428	9.471	11.142	12.999	14.856	16.713
10D0	3.669	6.670	10.005	13.340	17.009	20.010	23.345	26.680	30.015
10D1	3.411	6.202	9.303	12.404	15.815	18.606	21.707	24.808	27.909
10D2	3.169	5.762	8.643	11.524	14.693	17.286	20.167	23.048	25.929
10D3	3.071	5.584	8.376	11.168	14.239	16.752	19.544	22.336	25.128
10D4	2.992	5.440	8.160	10.880	13.872	16.320	19.040	21.760	24.480
10R0	5.351	10.702	16.053	21.404	27.290	32.106	37.457	42.808	48.159
10R1	4.924	9.848	14.772	19.696	25.112	29.544	34.468	39.392	44.316
10R2	4.555	9.110	13.665	18.220	23.231	27.330	31.885	36.440	40.995
10R3	4.143	8.286	12.429	16.572	21.129	24.858	29.001	33.144	37.287
10R4	3.947	7.894	11.841	15.788	20.130	23.682	27.629	31.576	35.523



ภาพที่ 37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง
ที่เคลือบเป็นเวลา (ก) 7 ชั่วโมง (ข) 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง
ที่เคลือบ เป็นเวลา (ก) 9 ชั่วโมง (ข) 10 ชั่วโมง

ตารางที่ 7 ความหนา ความชัน และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง และค่า R^2

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	ความหนา	ความชัน	สภาพต้านทานไฟฟ้า	R^2
		(μm)	$\times 10^{-3}$ (V/ A)	($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	
1.1	6E0	0.70	31.207	0.0990	0.9998
1.2	6E1	0.70	28.644	0.0912	0.9998
1.3	6E2	0.82	27.632	0.1025	0.9998
1.4	6E3	0.76	26.983	0.0929	0.9998
1.5	6E4	0.71	25.685	0.0822	0.9998
2.1	7E0	0.86	29.491	0.1145	0.9998
2.2	7E1	0.83	24.946	0.0943	0.9997
2.3	7E2	0.91	23.896	0.0987	0.9998
2.4	7E3	0.80	23.360	0.0850	0.9997
2.5	7E4	0.71	22.161	0.0708	0.9998
3.1	8E0	0.92	28.413	0.1188	0.9998
3.2	8E1	0.94	22.814	0.0973	0.9998
3.3	8E2	0.86	21.884	0.0856	0.9998
3.4	8E3	1.00	21.340	0.0964	0.9997
3.5	8E4	0.89	20.084	0.0812	0.9998
4.1	9E0	1.11	27.324	0.1373	0.9998
4.2	9E1	1.08	23.101	0.1132	0.9998
4.3	9E2	1.08	21.217	0.1038	0.9997
4.4	9E3	1.12	20.135	0.1024	0.9998
4.5	9E4	1.10	19.162	0.0959	0.9998
5.1	10E0	1.21	26.279	0.1446	0.9998
5.2	10E1	1.14	21.597	0.1115	0.9998
5.3	10 E2	1.14	19.877	0.1029	0.9999
5.4	10E3	1.19	18.819	0.1016	0.9998
5.5	10E4	1.12	18.364	0.0933	0.9998

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	ความหนา	ความชัน	สภาพต้านทานไฟฟ้า	R ²
		(μm)	$\times 10^{-3}$ (V/ A)	($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	
6.1	6D0	0.64	43.099	0.1254	0.9998
6.2	6D1	0.64	40.830	0.1191	0.9998
6.3	6D2	0.59	39.072	0.1036	0.9998
6.4	6D3	0.59	37.304	0.0989	0.9998
6.5	6D4	0.65	35.992	0.1055	0.9997
7.1	7D0	0.72	36.312	0.1191	0.9998
7.2	7D1	0.66	34.344	0.1027	0.9999
7.3	7D2	0.80	32.732	0.1182	0.9999
7.4	7D3	0.69	31.219	0.0972	0.9999
7.5	7D4	0.72	29.993	0.0973	0.9999
8.1	8D0	0.63	34.907	0.1003	0.9999
8.2	8D1	0.77	32.003	0.1112	0.9999
8.3	8D2	0.81	30.419	0.1110	0.9998
8.4	8D3	0.71	29.842	0.0957	0.9999
8.5	8D4	0.76	28.737	0.0987	0.9998
9.1	9D0	0.88	34.727	0.1380	0.9999
9.2	9D1	0.91	32.201	0.1323	0.9998
9.3	9D2	0.91	30.638	0.1258	0.9999
9.4	9D3	0.92	29.064	0.1217	0.9999
9.5	9D4	0.87	28.373	0.1121	0.9999
10.1	10D0	1.04	32.979	0.1553	0.9999
10.2	10D1	1.02	30.665	0.1420	0.9998
10.3	10D2	1.03	28.490	0.1326	0.9998
10.4	10D3	1.13	27.610	0.1419	0.9998
10.5	10D4	0.95	26.898	0.1153	0.9998

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มตัวอย่าง	ความหนา (μm)	ความชัน $\times 10^{-3}$ (V/ A)	สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)	R^2
11.1	6R0	0.40	60.1868	0.1099	0.9997
11.2	6R1	0.41	53.509	0.0989	0.9998
11.3	6R2	0.41	49.765	0.0920	0.9998
11.4	6R3	0.37	47.483	0.0790	0.9999
11.5	6R4	0.41	46.301	0.0858	0.9998
12.1	7R0	0.49	57.494	0.1279	0.9998
12.2	7R1	0.47	50.898	0.1079	0.9999
12.3	7R2	0.46	47.180	0.0988	0.9998
12.4	7R3	0.44	44.955	0.0894	0.9998
12.5	7R4	0.44	43.709	0.0879	0.9998
13.1	8R0	0.59	56.485	0.1510	0.9999
13.2	8R1	0.57	50.512	0.1305	0.9998
13.3	8R2	0.58	46.478	0.1213	0.9999
13.4	8R3	0.50	43.976	0.0986	0.9999
13.5	8R4	0.58	41.810	0.1106	0.9998
14.1	9R0	0.65	54.597	0.1596	0.9999
14.2	9R1	0.62	50.562	0.1414	0.9999
14.3	9R2	0.62	45.766	0.1275	0.9999
14.4	9R3	0.58	41.939	0.1093	0.9998
14.5	9R4	0.58	40.624	0.1069	0.9999
15.1	10R0	0.69	59.456	0.1856	0.9999
15.2	10R1	0.72	54.711	0.1780	0.9999
15.3	10R2	0.62	50.611	0.1419	0.9998
15.4	10R3	0.61	46.033	0.1268	0.9999
15.5	10R4	0.71	43.856	0.1415	0.9999

สรุป

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางนิกเกิลลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีสปัตเตอร์ และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนใช้ผงนิกเกิล(99.9%) เป็นเป้าสารเคลือบ ส่วนวิธีดีซีสปัตเตอร์ และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ใช้แผ่นนิกเกิล (99.9%) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.620 เซนติเมตร และหนา 0.318 เซนติเมตร เป็นเป้าสารเคลือบ ภายใต้ความดันก๊าซอาร์กอนประมาณ 10^{-3} ทอร์ ใช้เวลาในการเคลือบต่างกัน 5 ช่วง คือ ใช้เวลาเคลือบฟิล์ม (t) 6 ชั่วโมง , 7 ชั่วโมง , 8 ชั่วโมง , 9 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง นำฟิล์มที่เคลือบในแต่ละวิธี มาแบ่งเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และชุดที่ 2 – 5 ผ่านการอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ (T) 100, 200, 300 และ 400 °C ตามลำดับ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์มตัวอย่าง พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากัน ฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีค่าความหนาและอัตราการเคลือบมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอร์ และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ ตามลำดับ

2. การศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางนิกเกิลซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า พบว่าฟิล์มตัวอย่างมีค่าคงตัวแลตทิซ a ระหว่าง 0.41247 – 0.41261 nm ซึ่งแตกต่างจากค่ามาตรฐานเล็กน้อย ($a_s = 0.42152$ nm)

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบ (011) ของฟิล์มตัวอย่าง พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าวิธีดีซีสปัตเตอร์ และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอร์ และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ ตามลำดับ ฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากขึ้น แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

3. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง เมื่อใช้สมการเซอร์เรอร์คำนวณขนาดเกรนยังผลของระนาบ (011) พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีขนาดเกรนระหว่าง 103.04 – 195.02 nm วิธีดีซีสปีดเตอริงมีขนาดเกรนระหว่าง 86.67 – 168.35 nm และฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงมีขนาดเกรนระหว่าง 58.34–110.01 nm ขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบฟิล์มมีค่าสูงขึ้นหรือเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มนานขึ้น

4. การศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ ฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อน และฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณขนาดเกรนของระนาบ (011) โดยใช้สมการเซอร์เรอร์

5. การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง โดยการวัดด้วยชุดหัววัดสี่จุด พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ตามลำดับ ฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น มีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง แสดงว่าการอบด้วยความร้อนทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกสูงขึ้นและขนาดเกรนใหญ่ขึ้น จึงมีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธนัสถา รัตนะ, อาทร โกไคยพิสิฐ และ พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ. 2547. การศึกษาการเคลือบฟิล์มบาง
อลูมิเนียมออกไซด์. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่
30: 217-218

เบญจพล ต้นสู. 2547. โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ปลูกโดย
เทคนิคการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จรูณี ต.เทียนประเสริฐ. 2548 . การศึกษาสมบัติฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและ
อาร์เอฟสเปคเตอรริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bin, L., T. Klemmer, S. Khizroev, J. K. Howard, D. Litvinov, A. G. Roy and D. E. Laughlin.
2001. CoCrPtTa/Ti perpendicular media deposited at high sputtering rate. **IEEE
Transactions on Magnetics.** 37: 1319-1322.

Cullity, B.D. 1967. **Element of X-ray Diffraction.** Addison-Wesley Publ. Co. Inc.,
Massachuetts.

Hjortsberg, A., I. Hamberg and C.G. Granqvist. 1981. Transparent and Heat-Reflecting Indium
Tin Oxide Film Prepared by Reactive Electron Beam Evaporation. **Thin Solid Film,**
90: 323-326.

Lee C.C., S.C. Shiau and Y. Yang. 1999. the characteristics of Indium Tin Oxide (ITO) film
Prepared by Ion-Assisted Deposition. **42nd Annual Tech. Conference Proceeding.**
Society of Vacuum Coaters. 42: 261-264.

Liu C., T. Mihara, T. Matsutani, T. Asanuma and M. Kiuchi . 2003. Preparation and
Characterization of Indium Tin Oxide Films Formed by Oxygen Ion Beam Assisted
Deposition. **Solid state Communications.** 126: 509-513.

Morton D.E. and A. Dinca.1999. Ion-Assisted Deposition of E-Gun Evaporated ITO Films at Low Substrate Temperatures, **42nd Annual Tech. Conference Proceeding**. Society of Vacuum Coaters. 42: 250-254.

Ohring, M. 2002. **Materials Science of Thin Films**. 2nd ed. Academic Press,USA.

Salehi, A. 1998. The effects of deposition rate and substrate temperature of ITO thin films on electrical and optical properties. **Thin Solid Films**. 324: 214-218.

Synowicki R.A. 1998. Spectroscopic Ellipsometry Characterization of Indium Tin Oxide Film Microstructure and Optical Constants. **Thin Solid Films**. 313-314:394-397

Zhang K., A.R. Forouhi and D.V. Likhachev. 1999. Accurate and Rapid Determination of Thickness, n and k Spectra, and Resistivity of ITO Films. **42nd Annual Tech. Conference Proceeding**. Society of Vacuum Coaters. 42 :255-260.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณความหนา, อัตราการเคลือบ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

ก.1 ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มตัวอย่างที่ 1.1 หรือ 6 E 0

จากตารางที่ 3 ได้ค่า $\Delta m/ab = 6.23 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$ และความหนาแน่นของนิกเกิล $\rho_{\text{Ni}} = 8.90 \text{ g/cm}^3$ จะได้ความหนา h ของฟิล์มซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ (45) ดังนี้

$$h = \frac{\Delta m}{a \cdot b \cdot \rho_{\text{Ni}}} = \frac{6.23 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2}{8.90 \text{ g/cm}^3} = 0.70 \times 10^{-6} \text{ m}$$

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเคลือบของฟิล์มตัวอย่างที่ 1.1 หรือ 6 E 0

เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง (360 นาที) จะได้อัตราการเคลือบ R ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ (46) ดังนี้

$$R = \frac{h}{t} = \frac{0.70 \times 10^{-6} \text{ m}}{360 \text{ minute}} = 1.9 \text{ nm/min}$$

ก.3 ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่างที่ 1.1 หรือ 6 E 0

จากตารางที่ 3 ได้ความหนาของฟิล์ม $h = 0.70 \text{ } \mu\text{m}$, $V/I = 31.207 \times 10^{-3} \text{ V/A}$ จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มตัวอย่างซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ (44) ดังนี้

$$\rho = \frac{\pi h \left(\frac{V}{I} \right)}{\ln 2}$$

$$\rho = \frac{\pi h}{\ln 2} \times (\text{ความชัน}) = 4.5324 \times h \times \text{ความชัน}$$

$$= 4.5324 \times 0.7 \text{ } \mu\text{m} \times 31.207 \times 10^{-3} \text{ V/A}$$

$$= 0.0990 \text{ } \mu\Omega\text{.m}$$

ภาคผนวก ข

ตารางมาตรฐานที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยงเบนรังสีเอกซ์ของนิกเกิล

ตารางผนวกที่ ข1 ตารางมาตรฐานที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของนิกเกิล ที่มี
โครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า

2θ (°)	ความเข้ม %(a.u.)	ระนาบ (hkl)	ระยะระหว่างระนาบ d_{hkl} (nm)
41.531	30	002	0.217264
44.521	100	011	0.203342
58.422	13	012	0.157840
70.982	10	110	0.132679
78.002	8	103	0.122399

โดยมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a) เท่ากับ 0.42152 nm