



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยกระบวนการดีซีสเปตเตอริงและอาร์เอฟสเปตเตอริง

Study of Si Thin Film Deposited by DC Sputtering and RF Sputtering Processes

นามผู้วิจัย นายจิระวัฒน์ เกื่อนรัตน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุปรียา ศรีวิจิตรเกษม, Dr.Ing.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รณปรี ชิงห์, วท.ม.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เชียงกา, Dr.rer.nat.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์, วท.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยกระบวนการดีซีสปัตเตอร์และอาร์เอฟสปัตเตอร์

Study of Si Thin Film Deposited by DC Sputtering and RF Sputtering Processes

โดย

นายจิระวัฒน์ เกื่อนรัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
พ.ศ. 2550

จิระวัฒน์ เกื่อนรัตน์ 2550: การศึกษาฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยกระบวนการดีซี
สปีดเตอริงและอาร์เอฟสปีดเตอริง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขา
ฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ ประชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สุปรียา
ศรีวิจิตรเกษม, Dr.Ing. 65 หน้า

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางซิลิกอนด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง
ความดันก่อนการเคลือบฟิล์มมีค่าประมาณ 2×10^{-5} mbar โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นซิลิกอน
บริสุทธิ์ 99.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.620 cm และหนา 0.318 cm ใช้แผ่นรองรับเป็นแผ่น
ควอตซ์ ความดันก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบมีค่าประมาณ 8×10^{-3} mbar ใช้กำลังไฟฟ้าในการ
เคลือบฟิล์ม 3 ค่า คือ 100, 150 และ 200 W และเวลาในการเคลือบฟิล์ม 1 - 3 ชั่วโมง พบว่า ที่
กำลังไฟฟ้าและเวลาในการเคลือบเท่ากัน กระบวนการดีซีสปีดเตอริงมีอัตราการเคลือบเร็วกว่า
และให้ฟิล์มที่มีความหนามากกว่ากระบวนการอาร์เอฟสปีดเตอริง

เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 °C และ
เวลาในการอบ 5, 10 และ 20 ชั่วโมง แล้วศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางซิลิกอนที่
เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และ
ความเป็นผลึกของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้
อบฟิล์ม

เมื่อใช้สมการของเชอร์เรอร์คำนวณขนาดเกรนของฟิล์ม พบว่าได้ผลเช่นเดียวกับความ
เป็นผลึกของฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มที่เคลือบด้วย
วิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

Chirawat Klunrat 2007: Study of Si Thin Film Deposited by DC Sputtering and RF Sputtering Processes. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Associate Professor Supreya Trivijitkasem, Dr.Eng.
65 pages.

Silicon thin films were deposited by DC and RF sputtering processes in vacuum chamber with base pressure of typically 2×10^{-5} mbar. A Si target, 7.620 cm diameter and 0.318 cm thickness, with a nominal purity of 99.9% was used. The Si films were deposited on quartz at an argon pressure of 8×10^{-3} mbar. Three deposition powers were used: 100, 150 and 200 W. The deposition times were varied from 1 - 3 hours. The results showed that, at a giving deposition power and a giving deposition time, DC sputtering process provided faster deposition rate and thicker Si film than RF sputtering process.

After annealing Si films at 700, 800, 900 and 1000 °C for 5, 10 and 20 hours, the microstructure of the Si films was examined by SEM and XRD. It was found that DC sputtering films showed better crystallinity than RF sputtering film. Higher crystallinity was obtained at higher deposition power, annealing temperature and annealing time.

The crystallite grain sizes of the film, calculated from Sherrer's equation, gave the same results as crystallinity. Bigger grain sizes was found in DC sputtering film than RF sputtering film.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สุปรียา ศรีวิจิตรเกษม ประธานกรรมการที่ปรึกษาซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ. รันปรี ชิงห์ กรรมการวิชาเอก ซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เชียงกา กรรมการวิชารอง ซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ได้ช่วยเหลือ ดูแลและให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน สำหรับคำปรึกษา ความช่วยเหลือ ประสพการณ์ต่างๆ กำลังกายและกำลังใจที่มีให้เสมอมา

จิระวัฒน์ เกื่อนรัตน์

กันยายน 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง	9
วิธีดีซีสปัตเตอร์ริง	9
สปัตเตอร์ริงยิลด์	13
ความดันก๊าซขณะทำการเคลือบ	15
วิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง	16
แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	18
การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	20
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	24
วัสดุที่ใช้เตรียมฟิล์มตัวอย่าง	24
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	24
อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง	26
อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง	26
อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มตัวอย่าง	27
วิธีเคลือบฟิล์มและการวิเคราะห์	28
การเคลือบฟิล์มตัวอย่าง	28
การศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง	29
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย	30
สถานที่ทำการวิจัย	30
ระยะเวลาทำการวิจัย	30
ผลและวิจารณ์	31
ผลการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง	31
ผลการศึกษามวล ความหนา และอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง	31
ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง	36
ผลการศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
แบบส่องกราด	51
สรุป	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	56
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบ	60
ภาคผนวก ข ตารางมาตรฐานจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกซิลิกอน	62
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณระยะระหว่างระนาบ แลตทิซพารามิเตอร์	
และขนาดเกรนของฟิล์ม	64

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	24
2	ชื่อฟิล์มตัวอย่าง เวลา t กำลังไฟฟ้า P ที่ใช้เคลือบฟิล์ม ความกว้าง a ความยาว b มวล m_1 ก่อนเคลือบ มวล m_2 หลังเคลือบ ความหนาของฟิล์ม th และอัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย R_{av}	32
3	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาได้จากระนาบ (111) ของรูปแบบการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ของ ฟิล์มตัวอย่าง $tXP(T)_t$ โดย $\Delta(2\theta) = 2\theta - 2\theta_s$ และ $\Delta a = a - a_s$	39
ตารางผนวกที่		
ข1	ตารางมาตรฐานจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟลักซ์ซิลิกอน ที่มี โครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า	63

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ระบบคิชีสปัตเตอร์ริง	9
2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์จลน์และผลคูณของความดันก๊าซกับระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า	10
3	(ก) โครงสร้างของพลาสมา และ (ข) การแจกแจงศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้า	11
4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิเล็ก S กับพลังงานของไอออนตกกระทบ	13
5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิเล็กกับมุมตกกระทบ θ ของไอออน	14
6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอิเล็ก และอัตราการเคลือบกับความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบสปัตเตอร์ริง	15
7	ระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง	16
8	ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส I กับศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ V ของพลาสมา (ก) ที่สภาวะเริ่มต้น และ (ข) ที่สภาวะสม่ำเสมอ	17
9	แท่งแม่เหล็กถาวรที่ขั้วคาโทดของระบบคิชีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง	18
10	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	19
11	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบอะตอมที่อยู่ติดกัน	20
12	ส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	23
13	เครื่องซิงโครตรอน	25
14	เตาเผาความร้อนสูง	25
15	เครื่องเคลือบฟิล์ม UNIVEX 300	26
16	เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	27
17	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
18	มวลของฟิล์มต่อพื้นที่ที่เคลือบที่ (ก) เวลา t (ข) กำลังไฟฟ้า P	34
19	ความหนาของฟิล์มที่ (ก) เวลา t (ข) กำลังไฟฟ้า P	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	อัตราการเคลือบฟิล์มเคลือบที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ	36
21	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.0D20(NA) – 1.0D20(10)10	41
22	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.5D20(NA) – 1.5D20(10)10	42
23	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 2.0D20(NA) – 2.0D20(10)10	43
24	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.0R20(NA) – 1.0R20(10)10	44
25	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.5R20(NA) – 1.5R20(10)10	45
26	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 2.0R20(NA) – 2.0R20(10)10	46
27	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 3.0D10(09)10, 2.0D15(09)10, 1.5D20(09)5 และ 1.5D20(09)20	47
28	(ก) ความเข้ม I ที่อุณหภูมิที่ใช้อบ T (ข) ความเข้ม I ที่ระยะเวลาที่ใช้เคลือบ t	48
29	ขนาดเกรน D ที่อุณหภูมิที่ใช้อบ T ของฟิล์มที่เคลือบด้วย (ก) วิธีดีซี สปีดเตอริงและ (ข) วิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง	49
30	ความเข้ม I และขนาดเกรน D ของระนาบ (111) จากรูปแบบการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P	50
31	ความเข้ม I และขนาดเกรน D ของระนาบ (111) จากรูปแบบการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่อบเป็นเวลา t_a	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 200 W นาน 1.5 ชั่วโมง (ก) ไม่อบด้วยความร้อน (ข) (ค) และ (ง) อบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ	51
33	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 200 W นาน 3.0 ชั่วโมง (ก) ไม่อบด้วยความร้อน (ข) (ค) และ (ง) อบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ	52

การศึกษาฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยกระบวนการดีซีสปีดเตอริง และอาร์เอฟสปีดเตอริง

Study of Si Thin Film Deposited by DC Sputtering and RF Sputtering Processes

คำนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก จึงมีการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ โดยกระบวนการผลิตชิพ (chip) จะมีขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำสลับกับชั้นไดอิเล็กทริกส์ (dielectrics) และชั้นโลหะจำนวนมากบนซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) เป็นต้น

โดยทั่วไป การเคลือบฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบด้วยไอสารทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD) และการเคลือบด้วยไอสารทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition, PVD) ฯลฯ การเคลือบฟิล์มบางแบบ CVD จะปล่อยก๊าซของสารเคมีตั้งต้นเข้าสู่แชมเบอร์ (chamber) สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ (substrate) ซึ่งวางอยู่ในแชมเบอร์ ได้เป็นไอสารเคลือบแล้วเคลือบเป็นฟิล์มบนแผ่นรองรับ สำหรับการเคลือบฟิล์มแบบ PVD จะใช้กระบวนการทางฟิสิกส์ทำให้เกิดไอสารเคลือบ แล้วไอสารเคลือบจะถูกส่งไปยังแผ่นรองรับในสภาพแวดล้อมที่มีความดันต่ำ การเคลือบฟิล์มบางในวิธี PVD ได้แก่ วิธีระเหยสาร (evaporation) และวิธีสปีดเตอริง (sputtering)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเป็นวิธีที่ให้ความร้อนกับสารเคลือบ เพื่อให้สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอสารเคลือบ แต่เนื่องจากสารเคลือบบางชนิดมีความดันไอ (vapor pressure) ต่ำมาก จึงมีจุดเหลวและจุดเดือดสูง การระเหยสารเคลือบที่มีจุดเดือดสูง ๆ ต้องทำให้ความดันภายในแชมเบอร์มีค่าต่ำมาก ซึ่งเป็นการไม่สะดวกและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังได้ระเหยสารเคลือบที่มีพลังงานต่ำ ทำให้ได้ฟิล์มเคลือบที่ยึดเกาะกันไม่ดี

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ไอออนพลังงานสูงระดมชน (bombard) ฟิล์มเป้า (target) สารเคลือบ ซึ่งไอออนจะถ่ายโอน (transfer) พลังงานจลน์ให้เป้าสารเคลือบ ทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิว อะตอมสารเคลือบจากการสปัตเตอริงจะมีพลังงานสูงกว่าอะตอมสารเคลือบที่ได้จากวิธีระเหยสาร เมื่ออะตอมตกบนผิวแผ่นรองรับจะสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวและรวมตัวกันเป็นกลุ่มดีกว่า จึงทำให้ได้ฟิล์มที่มีการยึดเกาะสมบัติที่ดีกว่า ดังนั้นวิธีสปัตเตอริงจึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กับสารเคลือบมากมายหลายชนิด

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงมี 2 ชนิดคือ วิธีดีซีสปัตเตอริง (DC sputtering) และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง (RF sputtering) วิธีดีซีสปัตเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการเคลือบสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงในการเคลือบสาร ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบสปัตเตอริงเรียกว่าวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) ซึ่งเป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบฟิล์ม ทำให้ระบบมีอัตราการเคลือบ (deposition rate) สูงกว่าวิธีสปัตเตอริงธรรมดา

การวิจัยนี้ ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนโดยวิธีดีซีสปัตเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยนำฟิล์มบางซิลิกอนส่วนหนึ่งไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วจึงศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค (microstructure) และลักษณะเกรนของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีทั้งสองซึ่งไม่อบและอบด้วยความร้อน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอน ด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงและวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่างๆ
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มด้วยความร้อนกับความเป็นผลึก (crystallinity) ของฟิล์ม
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)
4. เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง โดยคำนวณหาแลตทิทพารามิเตอร์และขนาดเกรน
5. เพื่อศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอนบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นควอตซ์ด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน 3 ค่า คือ 100, 150 และ 200 W โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มต่างกัน 5 ช่วง คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง แล้วศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ค่า ศึกษากำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มต่อความเป็นผลึกของฟิล์มด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ คำนวณขนาดเกรนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ และศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจเอกสาร

Liang *et al.* (1979) ได้เคลือบฟิล์มซิลิกอนด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้ซิลิกอนเวเฟอร์เป็นแผ่นรองรับ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 14.5 MHz อุณหภูมิระหว่างเคลือบเท่ากับ 25 °C ความดันก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 30 และ 40 mTorr พบว่าความหนาของฟิล์มตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น และความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงมากที่ความถี่ 13.56 MHz จากการวัดความเข้มข้นของอาร์กอนในฟิล์มตัวอย่างด้วยเทคนิค Rutherford backscattering พบว่าความเข้มข้นของอาร์กอนและอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟิล์มบางซิลิกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนลดลงและความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

Masaki *et al.* (1993) ได้เตรียมฟิล์มบางซิลิกอนด้วยวิธี plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) โดยเคลือบบนควอตซ์ที่อุณหภูมิ 300 °C ความหนาของฟิล์ม 1 μm จากนั้นนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิช่วง 550 ถึง 650 °C เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) พบว่าเศษส่วนความเป็นผลึก (crystalline fraction) และขนาดเกรนในฟิล์มบางซิลิกอนขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ออบฟิล์ม โดยเศษส่วนความเป็นผลึกและขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ออบเพิ่มขึ้น

Jia *et al.* (2000) ได้เคลือบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (amorphous silicon, a-Si) ด้วยวิธี PECVD โดยใช้ก๊าซซิลเลน (silane, SiH_4) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจน ($\text{SiH}_4/\text{H}_2 = 25\%$) บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก Corning 7059 อุณหภูมิของแผ่นรองรับ 190 °C ขณะเคลือบใช้แสงจากหลอดไส้ทั้งสแตนด์จำนวน 3 หลอด ซึ่งแต่ละหลอดมีกำลัง 1 kW ฉายไปที่แผ่นรองรับ ฟิล์มตัวอย่างมีความหนา 1.5 μm แล้วนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกไป ต่อจากนั้นอบฟิล์มที่อุณหภูมิในระหว่าง 550 - 650 °C เป็นเวลา 10 นาที ถึง 2 ชั่วโมง เพื่อให้ฟิล์มบางซิลิกอนเกิดผลึก เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเวลาที่ใช้ออบฟิล์มเพื่อให้มีความเป็นผลึกเท่ากันมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบเพิ่มขึ้น และเวลาที่ใช้ออบสำหรับฟิล์มที่ใช้วิธีฉายแสงขณะเคลือบมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มด้วยความร้อนธรรมดา

Makihara *et al.* (2000) ได้เคลือบฟิล์มบาง hydrogenated microcrystalline silicon ($\mu\text{-Si:H}$) ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 100 W อุณหภูมิแผ่นรองรับ 240 °C และความดันของก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและไฮโดรเจนเท่ากับ 8.0 Pa โดยเปลี่ยนอัตราส่วนความดันย่อยของไฮโดรเจน ($R(\text{H}_2) = P_{\text{H}_2} / (P_{\text{H}_2} + P_{\text{Ar}})$) เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มตัวอย่าง จากการวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งจากพลาสมาระหว่างเคลือบฟิล์ม พบว่า เมื่อ $R(\text{H}_2)$ เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นและความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาจากธาตุอาร์กอนลดลง ขนาดผลึกเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ $R(\text{H}_2)$ เพิ่มขึ้นจนถึง 50% และลดลงเมื่อ $R(\text{H}_2)$ มีค่ามากกว่า 50% ขึ้นไป และจากการศึกษา Raman spectra และการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า ความเข้มของฟีกเพิ่มขึ้นเมื่อ $R(\text{H}_2)$ มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 60% และลดลงเมื่อ $R(\text{H}_2)$ มีค่ามากกว่า 60% ขึ้นไป ความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจากธาตุไฮโดรเจนขึ้นกับ $R(\text{H}_2)$ โดยความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ $R(\text{H}_2)$ เพิ่มขึ้นจนถึง 60% และลดลงเมื่อ $R(\text{H}_2)$ มีค่ามากกว่า 60% ขึ้นไป ซึ่งที่ค่าความเข้มแสงที่เปล่งออกมาจากธาตุไฮโดรเจนสูงจะให้ฟิล์มตัวอย่างที่มีความเป็นผลึกสูง

Farhi *et al.* (2002) ได้เคลือบฟิล์มบาง a-Si ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อุณหภูมิ 300 °C ให้มีความหนาแน่นระหว่าง 0.63 μm ถึง 2.85 μm แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 620 °C ถึง 680 °C จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเปลี่ยนจากสถานะอะมอร์ฟัสไปเป็นผลึกของฟิล์มในระหว่างการอบด้วยความร้อนขึ้นกับความหนาของฟิล์ม เนื่องจากอะตอมซิลิกอนในฟิล์มที่มีความหนามากกว่าจะทับถมกันจนทำให้ความไม่เป็นระเบียบ (disorder) และความบกพร่อง (defect) ในเนื้อฟิล์มน้อยลง จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น

Kondo *et al.* (2002) ได้เตรียมฟิล์มบาง $\mu\text{-Si:H}$ บนแผ่นรองรับที่มีอุณหภูมิต่างๆ ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและไฮโดรเจน พบว่าอัตราการเคลือบมีค่าเกือบคงตัวที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับสองช่วง คือระหว่าง 70 °C - 150 °C และระหว่าง 200 °C - 350 °C โดยทั้งสองช่วงมีอัตราการเคลือบต่างกัน 25% ซึ่งอัตราการเคลือบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้นจาก 150 °C ไปเป็น 200 °C ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับอัตราการเคลือบฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนที่ผิวของแผ่นรองรับและการหลุดออกไป (desorption) จากผิวฟิล์มของโมเลกุลซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาระหว่างอะตอมทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับสูงขึ้น จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิของ

แผ่นรองรับต่ำกว่า 100 °C เป็นอะมอร์ฟัส แต่ฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 °C เป็น microcrystalline ความสูงของพิกในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และขนาดผลึกเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นของแผ่นรองรับ

Vaz et al. (2003) ได้เคลือบฟิล์มบาง titanium oxynitrides (TiN_xO_y) ด้วยวิธีอาร์เอฟรีแอคทีฟแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริง บนแผ่นรองรับ 3 ชนิดคือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นกระจก และซิลิกอนเวเฟอร์ระนาบ (100) โดยใช้แผ่นไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.731% เป็นเป้า ก่อนเคลือบทำความสะอาดแผ่นรองรับในพลาสมาของก๊าซอาร์กอนด้วยการสเปคเตอร์ริง โดยใช้กำลังไฟฟ้าอาร์เอฟ 200 W เป็นเวลา 15 นาที อุณหภูมิของแผ่นรองรับขณะเคลือบเท่ากับ 300 °C ศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอสให้กับแผ่นรองรับอยู่ในช่วง -50 ถึง 0 V แผ่นรองรับติดตั้งบนที่ยึดที่สามารถหมุนได้ด้วยอัตรา 4 รอบต่อวินาที ความดันก๊าซผสม ($\text{Ar/N}_2+\text{O}_2$) ขณะเคลือบมีค่าเท่ากับ 0.4 Pa ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.05 Pa พบว่าเมื่อมีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำฟิล์มบางมีสีทอง และเมื่อมีปริมาณก๊าซออกซิเจนสูงฟิล์มบางมีสีน้ำเงินเข้ม จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบาง TiN_xO_y มีความเข้มพิกในระนาบ (111) สูงขึ้นเมื่อปริมาณของออกซิเจนต่ำลงซึ่งมีตำแหน่งเดียวกันกับพิกจากระนาบ (111) ของ TiN ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า ความเป็นผลึกของฟิล์มตัวอย่างลดลงเมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ไบแอสแผ่นรองรับช่วยเพิ่มการระดมชนของไอออนบนฟิล์มตัวอย่าง ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น

Fukaya et al. (2005) ได้เคลือบฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอร์ริง โดยการไบแอสศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป้าสารเคลือบ และใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจนในการเคลือบ จากการศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และ Raman scattering spectra พบว่า เมื่อกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเพิ่มขึ้นและศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0 ถึง -500 V อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเป็นผลึกในฟิล์มตัวอย่างมีค่าสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ -300 V นั่นคือ พลังงานจลน์ของอะตอมซิลิกอนที่ถูกสเปคเตอร์ริงออกมาช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อตกกระทบผิวฟิล์ม ทำให้อะตอมเคลื่อนมารวมกันเป็นกลุ่มซึ่งมีผลอย่างมากต่อความเป็นผลึกของฟิล์ม

Abdesselem et al. (2006) ศึกษาผลกระทบการเติบโตของฟิล์มบาง a-Si:H ที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสเปคเตอร์ริง โดยเตรียมฟิล์มที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับและกำลังไฟฟ้าต่างกัน เพื่อเปลี่ยนแปลง

พลังงาน ฟลักซ์ และปฏิกิริยาของอนุภาค Si และ SiH ที่เข้าเคลือบที่พื้นผิวแผ่นรองรับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับมีค่าต่ำ การเติบโตของฟิล์มเกิดจากการทับถมกันของอนุภาค Si และ SiH เมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้น อะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์มจะลดลงเนื่องจากทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนหรือซิลิกอนที่อยู่ข้างเคียง ได้เป็นโมเลกุลที่สามารถระเหยหลุดออกไปจากผิวได้ง่าย ทำให้อนุภาค Si และ SiH สามารถเข้าเคลือบที่ผิวฟิล์มได้มากขึ้น อัตราการเคลือบจึงเพิ่มขึ้น อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 400 °C และ 300 °C สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ 70 W และ 100 W ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแผ่นรองรับสูงกว่าค่าเหล่านี้ อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอะตอมไฮโดรเจนในเนื้อฟิล์มจะแพร่ออกมาที่ผิวฟิล์ม ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนเหล่านี้จะทำพันธะกับแขนที่ว่าง (dangling bond) ของซิลิกอน ทำให้มีที่ว่างสำหรับอนุภาค Si และ SiH น้อยลง อัตราการเคลือบจึงมีค่าลดลง

Chan and Teo (2006) ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบและความดันขณะเคลือบที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพื้นผิว (surface morphology) ฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบบนแผ่นรองรับซิลิกอนชนิดพี (p-type silicon) ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอริง โดยทำการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง พบว่าอัตราการเคลือบฟิล์มทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ และมีค่าลดลงเมื่อความดันขณะเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วย Atomic force microscopy (AFM) และการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบสูง อะตอมทองแดงจะสามารถแพร่ไปบนผิวฟิล์มได้ดี จึงทำให้ฟิล์มทองแดงมีโครงสร้างจุลภาคดีขึ้น และเมื่อความดันขณะเคลือบมีค่าสูงจะทำให้ความเป็นผลึกในฟิล์มลดลง เนื่องจากเนื้อฟิล์มมีช่องว่าง (void) สูง

Huang *et al.* (2006) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอน (a-Si) ด้วยวิธี RF-PECVD ที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วนำฟิล์มตัวอย่างไปอบด้วยกระบวนการ rapid thermal annealing (RTA) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 60 วินาที ก่อนนำไปตกผลึกด้วยกระบวนการ solid phase crystallization (SPC) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 22 ชั่วโมง เมื่อนำไปศึกษาขนาดเกรนเฉลี่ยและความเป็นผลึกของฟิล์มบาง polycrystalline silicon ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และ Raman spectroscopy พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยกระบวนการ RTA ก่อนนำไปตกผลึก มีขนาดเกรนเฉลี่ยใหญ่กว่าและมีความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มที่ไม่อบด้วยกระบวนการนี้ ซึ่งแสดงว่าการอบฟิล์มตัวอย่างด้วยกระบวนการ RTA ช่วยเสริมกระบวนการตกผลึกของฟิล์มและช่วยลดเวลาในการตกผลึก

Jang *et al.* (2006) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) บนแผ่นรองรับที่เป็นผลึกซิลิกอนชนิดพี ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้ก๊าซอาร์กอนในการเคลือบอุณหภูมิของแผ่นรองรับคงตัวที่ 300 °C จากนั้นนำฟิล์มไปอบด้วยวิธี RTA เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยทำการอบในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์ม AlN ที่ไม่อบจะมีระนาบผลึกเป็น (100) และฟิล์มที่อบจะมีระนาบผลึกเป็น (103) โดยฟิล์มที่ (100) จะหายไป จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างไปใช้เป็นชั้นฉนวนในอุปกรณ์ metal-insulator-semiconductor (MIS) แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า (capacitance-voltage, C-V characteristic) พบว่าศักย์แถบแบน (flatband voltage, V_{FB}) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึก ฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบซึ่งมีระนาบผลึก (100) มีค่า V_{FB} เป็นลบ และฟิล์มที่ผ่านการอบซึ่งมีระนาบผลึกเป็น (103) มีค่า V_{FB} เป็นบวก และฟิล์มที่อบด้วยอุณหภูมิ 700 °C มี V_{FB} สูงที่สุด คือ 6.5 V

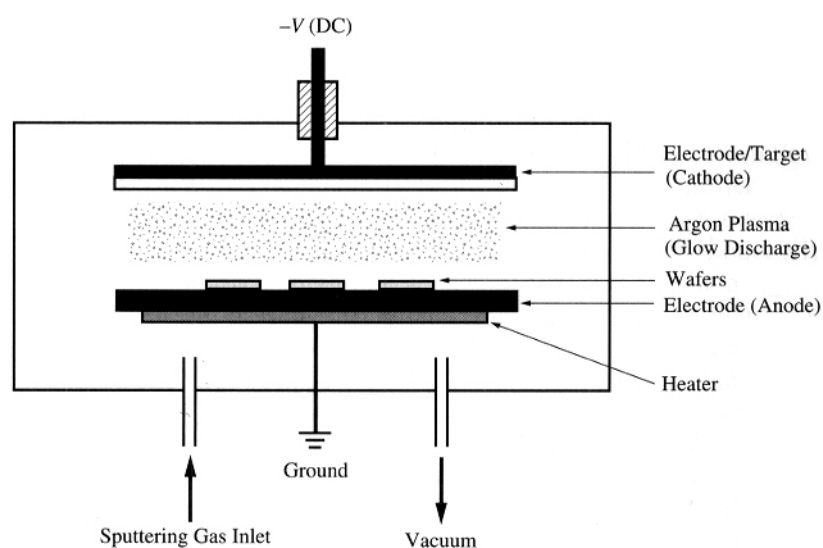
Aryal *et al.* (2007) ศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางคาร์บอนไนไตรด์ (carbon nitride, a-C:N_x) ที่เคลือบบนแผ่นรองรับซิลิกอนชนิดพีและควอตซ์ โดยการเคลือบด้วยไอสารทางเคมีแบบ microwave surface-wave plasma (MW SWP CVD) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C โดยใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน อะเซทิลีน และไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการไหลของอาร์กอนเป็น 100, 150, 200 และ 300 sccm อะเซทิลีน 5 sccm และไนโตรเจน 5 sccm จากการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง a-C:N_x ด้วยวิธี X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy และ UV-visible spectroscopy พบว่าได้ช่องว่างทางแสง (optical gap) อยู่ในช่วง 1.7 eV ถึง 2.2 eV เมื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 200 sccm จะได้ช่องว่างทางแสงต่ำสุด (1.7 eV) และอัตราการเคลือบสูงสุด (7.1 nm/min)

Chan and Teo (2007) ได้เคลือบฟิล์มบางทองแดงบนแผ่นรองรับที่เป็นซิลิกอนชนิดพี โดยอุณหภูมิของแผ่นรองรับขณะเคลือบเท่ากับอุณหภูมิห้อง ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง แล้วศึกษาผลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการเคลือบต่อขนาดผลึกของฟิล์มจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยกำลังไฟฟ้าสูงจะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับฟิล์ม โดยผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น และสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากความสามารถในการแพร่ของอะตอมทองแดงบนผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มดีขึ้น

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริงเป็นกระบวนการถ่ายโอนโมเมนตัม (momentum transfer) ของลำไอออนให้กับโลหะ ซึ่งได้ถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1852 เมื่อ Grove ได้ศึกษากระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (glow discharge) ในหลอดรังสีคาโทด (cathode ray tube) และสังเกตพบว่ามีโลหะตกสะสม (deposit) บนขั้วแอโนด ในปี ค.ศ. 1920 Langmuir ได้พัฒนากระบวนการสปัตเตอริงให้เป็นเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบาง และมีการพัฒนาเรื่อยมาจนกระทั่งในปัจจุบันกระบวนการสปัตเตอริงเป็นวิธีเคลือบฟิล์มบางที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง

วิธีดีซีสปัตเตอริง



ภาพที่ 1 ระบบดีซีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยระบบแสดงดังภาพที่ 1 ภายใน 챔เบอร์มีขั้วไฟฟ้าลบหรือขั้วคาโทด เป็นที่วางเป้าสารเคลือบ และขั้วไฟฟ้าบวกหรือขั้วแอโนด เป็นที่วางแผ่นรองรับและต่อลงดิน

ก่อนทำการเคลือบฟิล์ม จะต้องสุญอากาศออกจาก 챔เบอร์ เพื่อให้มีสิ่งปนเปื้อน (contaminate) เหลือน้อยที่สุดจนกระทั่งภายในระบบมีความดันประมาณ $10^{-6} - 10^{-8}$ mbar จากนั้นปล่อยก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงเข้าสู่ 챔เบอร์ จนกระทั่งภายใน 챔เบอร์มีความดันประมาณ 10^{-3} mbar ก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงมักเป็นก๊าซเฉื่อยเพราะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคลือบ ใน

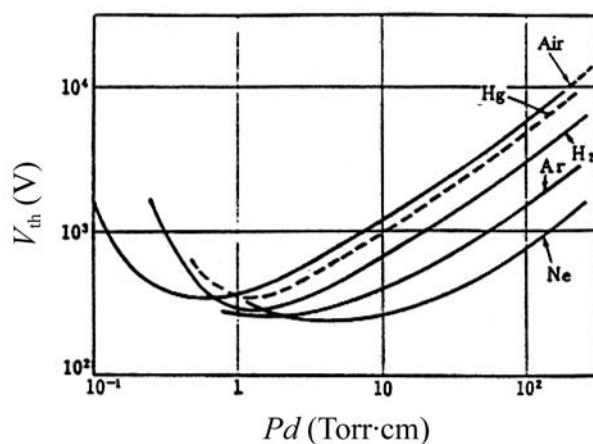
ระบบสปัดเตอริงทั่วไป จะใช้ก๊าซอาร์กอนเนื่องจากมีราคาถูก และมีขนาดอะตอมที่พอเหมาะ สำหรับการสปัดเตอริง

ความต่างศักย์ขีดเริ่ม V_{th} สำหรับกระบวนการก๊าซดิสชาร์จหรือพลาสมา เป็นดังสมการ

$$V_{th} = \frac{APd}{\ln(Pd)+B} \quad (1)$$

เมื่อ P คือ ความความดันของก๊าซ
d คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า
A และ B คือ ค่าคงตัวของระบบเคลื่อน

ภาพที่ 2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ขีดเริ่มและผลคูณของความดันก๊าซกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

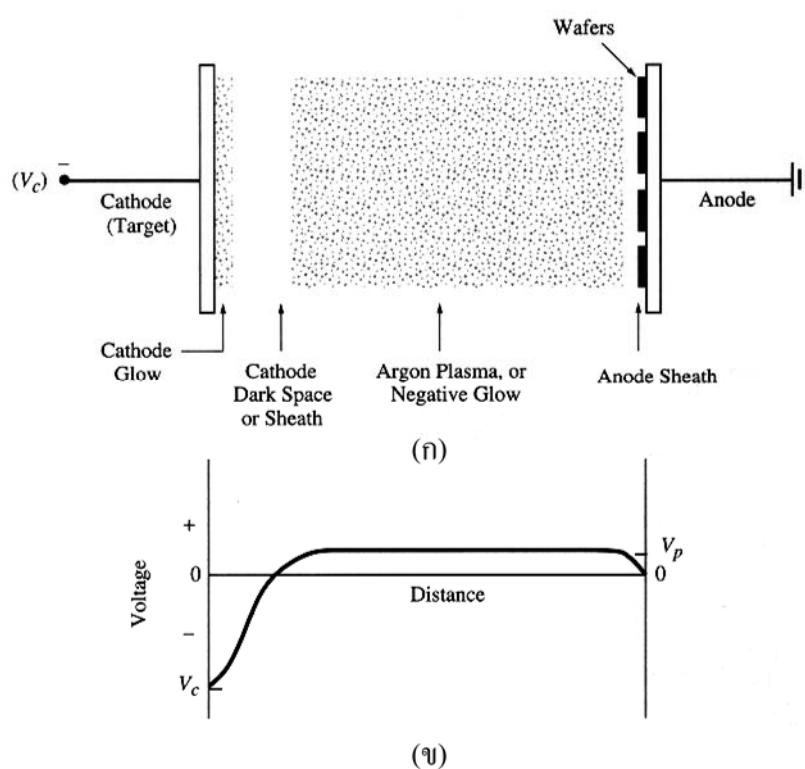


ภาพที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ขีดเริ่มและผลคูณของความดันก๊าซกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเร่งอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมของก๊าซจะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ดังสมการ



เมื่ออิเล็กตรอนทั้งสองถูกเร่งให้เคลื่อนที่ต่อไป อาจเกิดการชนกับอะตอมก๊าซอีก ทำให้เกิดไอออนและอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งเข้าหาคาโทด เมื่อไอออนชนกับผิวคาโทดจะมีอนุภาคต่าง ๆ และอิเล็กตรอนชุดที่สองหลุดออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนชุดที่สองนี้จะถูกเร่งออกไปจากคาโทดและเข้าชนกับอะตอมก๊าซทำให้เกิดไอออนเพิ่มมากขึ้นอีก จึงเป็นการเพิ่มจำนวนไอออนและอิเล็กตรอนมากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นทวีคูณ จนกระทั่งได้อิเล็กตรอนจำนวนมากพอที่จะผลิตไอออนในปริมาณมากพอที่จะทำให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนชุดที่สองเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนเดิมกลับคืนมา ซึ่งจะทำให้พลาสมาสามารถคงสภาพตัวเองได้



ภาพที่ 3 (ก) โครงสร้างของพลาสมา และ (ข) การแจกแจงศักย์ไฟฟ้า
ที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้า

พลาสมาที่ใช้ในระบบสปัตเตอริงเป็นพลาสมาที่มีการเรืองแสงอยู่ในช่วงการเรืองแสงผิดปกติ (abnormal glow) เนื่องจากการเรืองแสงในช่วงนี้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงมาก และพลาสมาที่เกิดขึ้นจะแผ่ขยายเต็มพื้นที่ของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงอย่างมีประสิทธิภาพ

ระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนดจะมีแถบเรืองแสงสลับกับแถบมืด ดังภาพที่ 3 (ก) แถบเรืองแสงคาโทด (cathode glow) เป็นบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่ไอออนรวมกับอิเล็กตรอนแล้วปล่อยโฟตอนออกมา แถบมืดคาโทด (cathode dark space) เป็นบริเวณที่เกือบไม่มีการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซเนื่องจากอยู่ในช่วงเส้นทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) ซึ่งเป็นระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอน เมื่อพ้นจากระยะปลอดการชน อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมก๊าซ ทำให้เกิดไอออนจำนวนมากที่บริเวณขอบของแถบเรืองแสงลบ (negative glow) หลังจากการชนกัน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ต่อไป และอาจชนกับอะตอมก๊าซอีก แต่อิเล็กตรอนมีพลังงานไม่สูงพอ จึงเป็นเพียงการกระตุ้นอะตอมให้มีพลังงานสูงขึ้นเท่านั้น และเมื่ออะตอมกลับสู่สถานะพื้น (ground state) จึงปล่อยโฟตอนออกมา

ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณต่าง ๆ ของระบบแสดงดังภาพที่ 3 (ข) ที่บริเวณระหว่างแถบมืดคาโทดและแถบเรืองแสงลบเป็นบริเวณที่มีประจุบวกสะสมอยู่มาก จึงกำบัง (screen) ศักย์ไฟฟ้าที่คาโทด ทำให้พลาสมาส่วนที่เหลือมีศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอ สำหรับที่บริเวณใกล้ขั้วแอโนดซึ่งเป็นแถบมืดแอโนดนั้น มีอิเล็กตรอนเคลื่อนไปที่ขั้วแอโนดจำนวนมากเนื่องจากอิเล็กตรอนมีสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ดีกว่าไอออน จึงมีประจุลบสะสมอยู่มาก และที่บริเวณพลาสมาจะมีประจุบวกสะสมอยู่มาก ทำให้บริเวณพลาสมามีศักย์ไฟฟ้า V_p เป็นบวกเทียบกับขั้วแอโนด

เมื่อไอออนเคลื่อนที่ผ่านแถบมืดคาโทด ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบมืดจะเร่งไอออนให้เข้าชนกับเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนตกกระทบผิวเป้าด้วยพลังงานสูงเพียงพอ จะทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาได้ พลังงานต่ำสุดที่ทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงได้ เรียกว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energy, E_{th}) ซึ่งขึ้นกับมวลของไอออนตกกระทบ มวลอะตอมของเป้าสารเคลือบ และพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy, U_B) ของอะตอมเป้าสารเคลือบ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

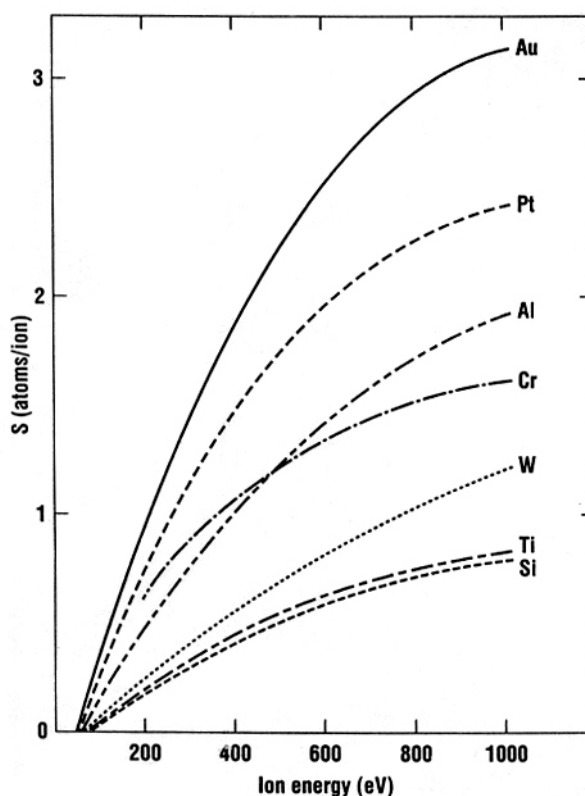
$$E_{th} = 4U_B \quad (3)$$

เมื่อไอออนชนกับเป้าสารเคลือบ อะตอมที่หลุดจากเป้าสารเคลือบ จะเคลื่อนผ่านพลาสมาไปถึงผิวหน้าของแผ่นรองรับ และควบแน่นกลายเป็นฟิล์ม ซึ่งอัตราการเคลือบฟิล์มจะขึ้นกับค่าสปัตเตอริงยิลด์ (sputtering yield, S) และความดันก๊าซขณะทำการเคลือบ

สปีดเทอริงยิลด์

นิยามของค่าสปีดเทอริงยิลด์คือจำนวนอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาต่อหนึ่งไอออนตกกระทบ ซึ่งขึ้นกับค่าพลังงาน ชนิดและมวลของไอออนที่ชน มุมตกกระทบของไอออน และความหนาแน่นของอะตอมสารเคลือบในระนาบผลึก ดังนี้

1. เมื่อไอออนที่มีพลังงานต่ำตกกระทบกับผิวเป้า ไอออนจะสามารถแทรกตัวลงไปในผิวได้ไม่มากนัก ทำให้มีอะตอมหลุดออกมาจำนวนน้อย เมื่อไอออนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ไอออนจะแทรกตัวลงไปได้ผิวได้มากขึ้น ทำให้มีอะตอมสารเคลือบหลุดออกมามากขึ้น แต่ถ้าไอออนมีพลังงานสูงมากๆ จะมีแนวโน้มที่จะแทรกลงไปได้ผิวลึกมากและฝังตัวอยู่ในผิวของเป้า ทำให้อะตอมหลุดออกน้อยลง ค่ายิลด์จึงลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4



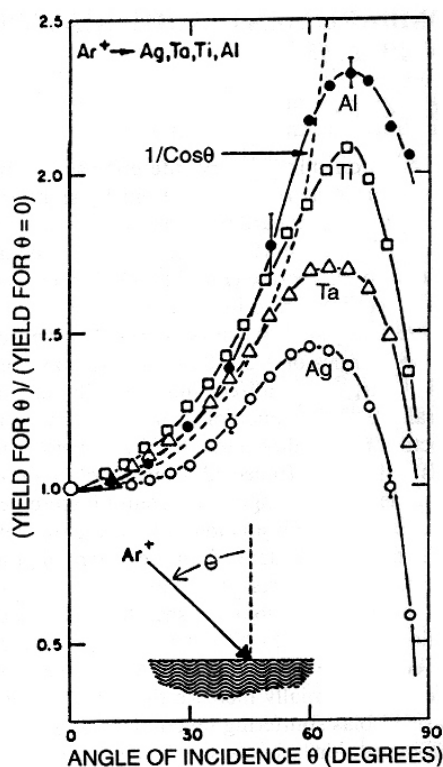
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายิลด์ S กับพลังงานของไอออนตกกระทบ

2. มวลของไอออน M_1 และมวลอะตอมสารเคลือบ M_2 มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการถ่ายโอนพลังงาน (energy transfer function) γ ดังนี้

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2} \quad (4)$$

จากสมการ (4) การถ่ายโอนพลังงานจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของไอออนและมวลอะตอมสารเคลือบมีค่าเท่ากัน ซึ่งพบว่าไอออนของก๊าซเฉื่อยให้ค่าyieldที่สูงที่สุด

3. ถ้าไอออนตกกระทบบนทำมุม $\theta=90^\circ$ กับแนวตั้งฉากผิวเป้า นั่นคือไอออนตกกระทบบนอยู่ในแนวขนานกับผิวเป้า ไอออนจะสะท้อนออกจากผิวโดยไม่ทำให้อะตอมหลุดออกไป ถ้าไอออนตกกระทบบนทำมุมตั้งฉากกับผิว นั่นคือไอออนตกกระทบบนทำมุม $\theta=0^\circ$ ไอออนมีโอกาสแทรกลงไปฝังตัวอยู่ใต้ผิวเป้า โดยทำให้อะตอมหลุดออกมาน้อย ดังนั้นจะได้ค่าyieldต่ำ ถ้าไอออนตกกระทบบนทำมุม $\theta \rightarrow 60^\circ$ กับแนวตั้งฉากผิวเป้า จะมีค่าyieldสูง ดังภาพที่ 5

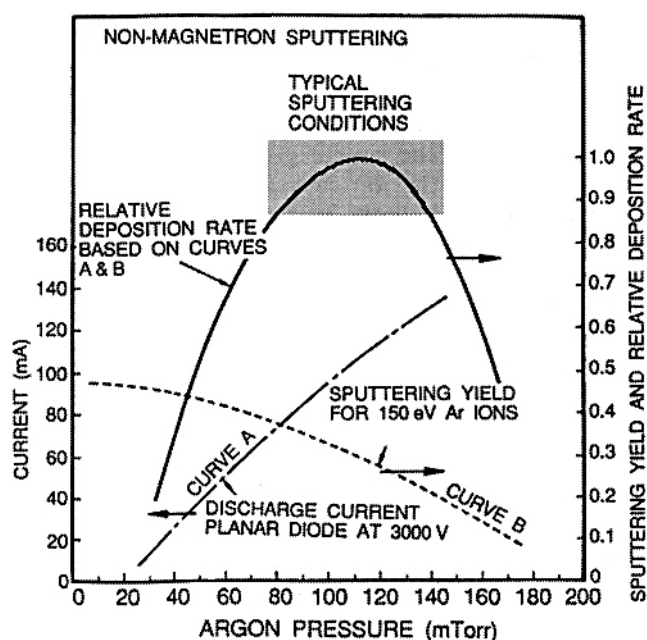


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าyieldกับมุมตกกระทบบน θ ของไอออน

4. ความหนาแน่นของอะตอมสารเคลือบในระนาบผลึกต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน ถ้าไอออนตกกระทบบนระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น จะทำให้อะตอมหลุดออกมามาก จึงได้ค่าyield สูง ถ้าไอออนตกกระทบบนระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ไอออนจะมีโอกาสฝังตัวลงไปใต้ผิว จึงได้ค่าyield ลดลง

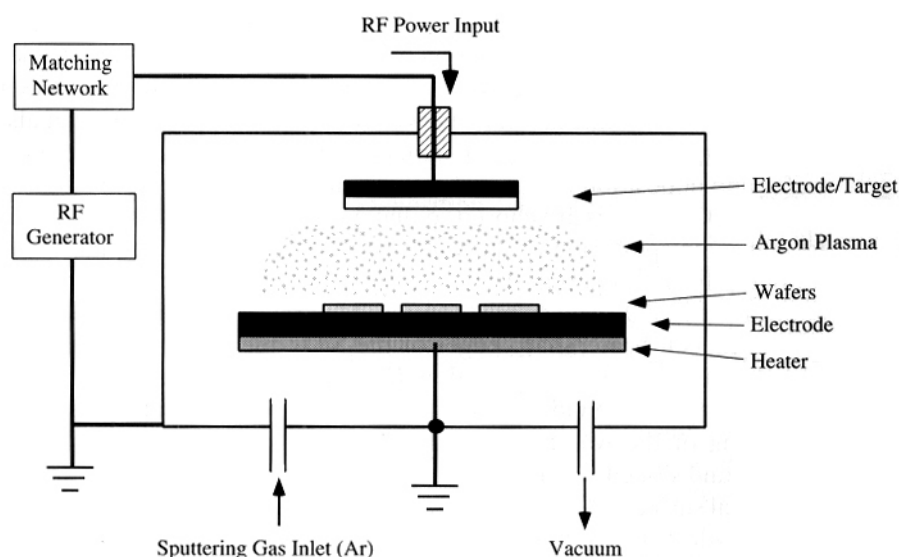
ความดันก๊าซขณะทำการเคลือบ

การเคลือบฟิล์มที่มีความดันต่ำๆ ซึ่งมีระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนกว้าง จะไม่ค่อยมีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซ ทำให้ได้ปริมาณไอออนน้อยและมีอัตราการเคลือบต่ำ แต่การเคลือบฟิล์มที่มีความดันสูงๆ ซึ่งมีระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนสั้น อิเล็กตรอนมีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออนได้ ทำให้ได้ปริมาณไอออนน้อย นอกจากนั้น เมื่ออะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรองรับ จะชนกับอะตอมก๊าซที่มีอยู่อย่างหนาแน่นบ่อยครั้ง ทำให้อะตอมสารเคลือบสูญเสียพลังงานและเปลี่ยนทิศทางไปก่อนที่จะไปถึงผิวของแผ่นรองรับ ทำให้มีอัตราการเคลือบต่ำเช่นกัน ความดันก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มได้แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส yield และอัตราการเคลือบ
กับความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบสปัตเตอร์

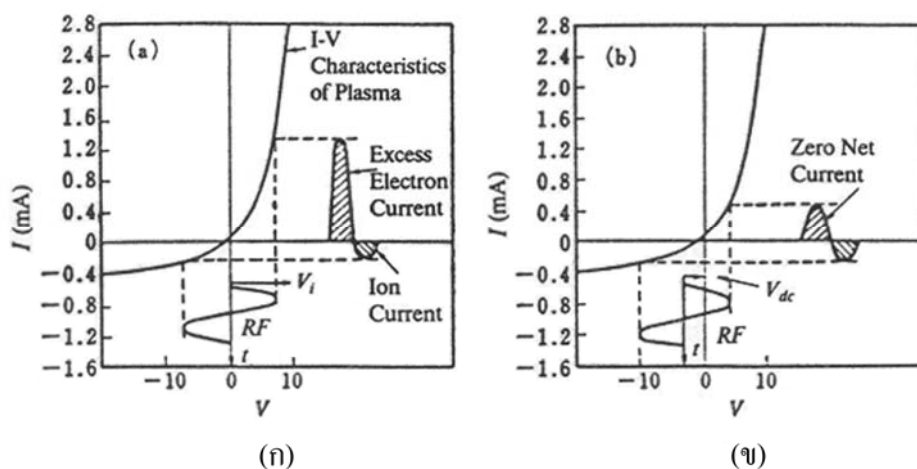
วิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง



ภาพที่ 7 ระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปีดเตอริงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า แต่ไม่เหมาะที่จะเคลือบวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เพราะว่าเมื่อไอออนเข้าชนเป้าสารเคลือบ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองหลุดออกมา ทำให้มีประจุบวกสะสมที่ผิวเป้าสารเคลือบ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบมีดคาโทดจึงมีค่าลดลงจนไม่สามารถเร่งให้อิเล็กตรอนและไอออนมีพลังงานสูงพอที่จะคงสภาพพลาสมาต่อไปได้

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่วิทยุในการเคลือบฟิล์มดังภาพที่ 7 ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้งสองสลับกัน ซึ่งช่วยให้กระบวนการสปีดเตอริงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เมื่ออิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาภายในพลาสมามีพลังงานสูงพอ จะชนกับอะตอมก๊าซและเกิดเป็นไอออนได้ จึงเป็นการเพิ่มปริมาณไอออนในระบบ โดยไม่ต้องใช้อิเล็กตรอนชุดที่สองจากขั้วไฟฟ้า และช่วยให้พลาสมาสามารถคงสภาพอยู่ได้ที่มีความดันก๊าซต่ำลง ซึ่งเป็นการลดปริมาณของก๊าซที่อาจปนเปื้อนลงในฟิล์มได้



ภาพที่ 8 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส I กับศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ V ของพลาสมา

(ก) ที่สภาวะเริ่มต้น และ (ข) ที่สภาวะสม่ำเสมอ

ในกรณีที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเป็นขั้วคาโทดและขั้วแอโนด สลับกันไปตามจังหวะสัญญาณไฟฟ้า อิเล็กตรอนและไอออนจะสามารถเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าได้ทัน กระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดขึ้นในพลาสมาจึง เหมือนกับกรณีไฟฟ้ากระแสตรง แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงเกิน 1 MHz จะมีเพียงอิเล็กตรอนเท่านั้น ที่สามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าและมี สภาพเคลื่อนที่ได้มากกว่าไอออน จึงทำให้กระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน มากกว่ากระแสไอออน ดังภาพที่ 8 (ก) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ (steady state) จุดทำงาน ของระบบจะเลื่อนไปทางศักย์ไฟฟ้าลบ เพื่อให้กระแสสุทธิที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละด้านมีค่าเป็นศูนย์ ดังภาพที่ 8 (ข) โดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การไบแอสตัวเอง (self bias) ซึ่งจะทำให้เกิด ความต่างศักย์ระหว่างพลาสมา กับขั้วไฟฟ้าที่สามารถเร่งไอออนให้เข้าชนผิวขั้วไฟฟ้าได้

กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริงจะเกิดการสปัตเตอร์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จึงต้องวางเป้าสาร เคลือบที่ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กกว่าอีกขั้วหนึ่งตามความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{V_t}{V_s} = \left(\frac{A_s}{A_t} \right)^4 \quad (5)$$

เมื่อ V_t และ V_s คือ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่วางเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ ตามลำดับ

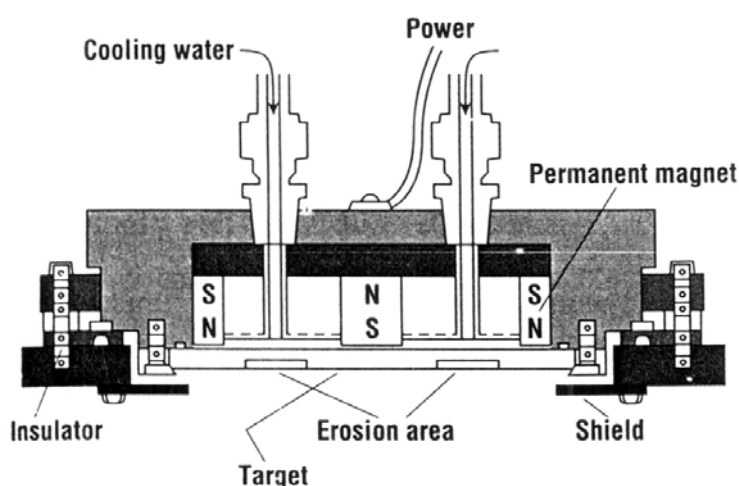
A_t และ A_s คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่วางเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ ตามลำดับ

จากสมการ (5) เมื่อทำให้พื้นที่ A_t มีขนาดเล็กลง และ A_s มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า V_t มีค่าสูงขึ้น การต่อขั้วไฟฟ้าที่วางแผ่นรองรับลงดินร่วมกับผนังของแชมเบอร์ จะทำให้พื้นที่ A_s มีขนาดใหญ่มากขึ้น

โดยทั่วไป ความถี่วิทยุอยู่ในช่วง 5 - 30 MHz สำหรับระบบอาร์เอฟสปีดเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 13.56 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่คณะกรรมการ FCC (Federal Communications Commission) กำหนดไว้สำหรับใช้งานที่เกี่ยวข้องกับพลาสมา ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ภายในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบอาร์เอฟสปีดเตอริงจะต้องมีวงจรปรับจูนอิมพีแดนซ์ (impedance matching) เพื่อให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้สูงสุด

แมกนีตรอนสปีดเตอริง

ระบบดีซีสปีดเตอริงและอาร์เอฟสปีดเตอริงสามารถผลิตปริมาณไอออนได้ค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าในกระบวนการอาร์เอฟสปีดเตอริงจะช่วยเพิ่มโอกาสให้อิเล็กตรอนชนกับอะตอมก๊าซ แต่ปริมาณไอออนที่ได้ยังไม่มากพอ จึงต้องใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบเรียกว่า แมกนีตรอนสปีดเตอริง เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับอะตอมก๊าซมากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณไอออนในระบบ



ภาพที่ 9 แท่งแม่เหล็กถาวรที่ขั้วคาโทดของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

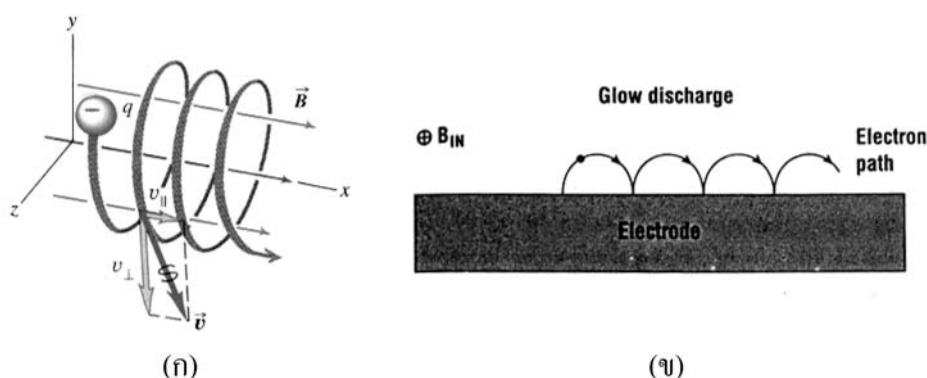
แมกนีตรอนสปัตเตอริงช่วยเพิ่มอัตราการเคลือบฟิล์มได้ประมาณ 10 – 100 เท่า และช่วยลดความดันของก๊าซขณะเคลือบได้มาก ช่วยให้ฟิล์มเคลือบมีความสะอาดสูง จึงทำให้ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยมีการนำไปใช้กับระบบดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริง เรียกว่าระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ตามลำดับ

การใส่สนามแม่เหล็กสามารถทำได้หลายวิธี ภาพที่ 9 แสดงการใส่แท่งแม่เหล็กถาวรไว้ด้านหลังเป้าสารเคลือบที่ขั้วคาโทดของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง วิธีนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและขนานกับผิวของเป้าสารเคลือบ

อิเล็กตรอนภายในพลาสมาจะได้รับแรง F กระทำจากสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก B ดังสมการแรงลอเรนตซ์ (Lorentz force)

$$F = qE + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

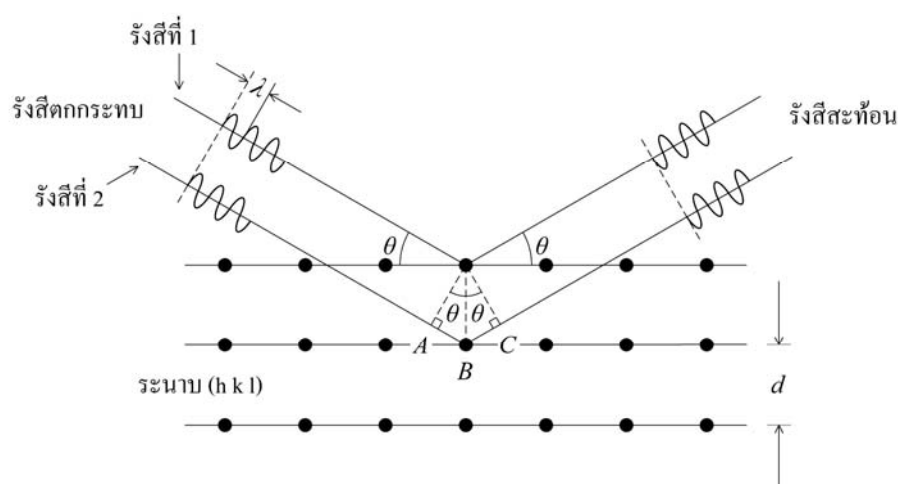
แรงลอเรนตซ์จะทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุ q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v วนเป็นเกลียว (helix) รอบแกนที่ขนานกับสนามแม่เหล็กดังภาพที่ 10 (ก) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในพลาสมานานขึ้น จึงเพิ่มโอกาสที่จะชนกับอะตอมก๊าซมากขึ้น ส่วนอิเล็กตรอนที่บริเวณใกล้ผิวเป้าจะเคลื่อนที่แบบกระโดด (hopping) ไปบนผิวเปื่อดังภาพที่ 10 (ข) ทำให้บริเวณดังกล่าวมีไอออนเกิดขึ้นจำนวนมาก ผิวเป้าส่วนนี้จึงถูกกัดกร่อน (erosion) ออกไปมากกว่าบริเวณอื่น



ภาพที่ 10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบหาธาตุ (substance) ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เมื่อผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนในอะตอมของสารจะกระเจิง (scatter) รังสีเอกซ์ออกมาทุกทิศทาง เมื่อรังสีที่กระเจิงออกมาจากอะตอมต่างๆ มีเฟสตรงกัน (in phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ซึ่งจะเกิดขึ้นในบางทิศทางเท่านั้น ถ้าอะตอมในผลึกเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ความเข้มของรังสีที่แทรกสอดกันจะสูงมาก โดยขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมในระนาบ รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของแต่ละธาตุจะมีลักษณะเฉพาะ ถ้าสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหลายชนิด รูปแบบการเลี้ยวเบนของธาตุแต่ละชนิดจะเป็นอิสระกัน ทำให้สามารถระบุธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่างนั้นได้



ภาพที่ 11 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบอะตอมที่อยู่ติดกัน

เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (monochromatic wavelength, λ) เข้าไปในผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 11 รังสีที่ 1 และ 2 ตกกระทบเป็นมุม θ กับระนาบ (h k l) ของอะตอม รังสีทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อรังสีที่ 2 เดินทางด้วยระยะทางที่มากกว่ารังสีที่ 1 เท่ากับ $AB + BC$ มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคูณกับความยาวคลื่น λ ดังนี้

$$AB + BC = n\lambda \quad (7)$$

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

จากภาพที่ 11 จะได้ $AB = BC = d \sin \theta$ โดย d เป็นระยะระหว่างระนาบ (interplanar spacing) เมื่อแทนค่า AB และ BC ในสมการ (7) จะได้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังนี้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (8)$$

การวิเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถทำได้ โดยใช้วิธี θ - 2θ ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (θ - 2θ diffractometer method) ซึ่งเป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีผง (powder method) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ ของตำแหน่งที่ปรากฏฟิสิก เมื่อแทนค่า θ และ λ ในกฎของแบรกก์ จะสามารถคำนวณหาระยะห่าง d ระหว่างระนาบ (hkl) ได้

แลตทิซพารามิเตอร์ a และ c ของผลึก สำหรับโครงสร้างผลึกลูกบาศก์และเตตระกอนอลสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

ผลึกลูกบาศก์
$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{a^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad (9)$$

ผลึกเตตระกอนอล
$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (10)$$

ความสูงของฟิสิกสามารถบอกความเป็นผลึกในฟิล์ม โดยความเป็นผลึกในฟิล์มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงของฟิสิก ฟิสิกที่สูงที่สุดบอกระนาบที่อะตอมชอบจัดเรียง (preferential orientation) ในฟิล์ม ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับผิวหน้าของฟิล์ม

ความกว้างของฟิสิกที่ครึ่งหนึ่งของความสูง (full width at half maximum, FWHM) สามารถนำไปคำนวณหาขนาดเกรน D_{hkl} ได้โดยใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Sherrer's equation)

$$D_{hkl} = \frac{0.89\lambda}{B \cos \theta} \quad (11)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

B คือ ความกว้างของฟิสิกที่ครึ่งหนึ่งของความสูง

θ คือ มุมแบรกก์ที่เกิดฟิสิก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) เป็นกล้องที่มีค่าการแยก (resolution) และกำลังขยายสูงมาก จึงสามารถให้ภาพโครงสร้างขนาดเล็กของวัสดุได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้สมบัติความเป็นคลื่นของอิเล็กตรอนมาใช้ในการสร้างภาพถ่าย ความยาวคลื่น λ_e ของอิเล็กตรอนจะขึ้นกับพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ V ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอน โดย

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2qmV}} \quad (12)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)
 q และ m คือ ประจุและมวลของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

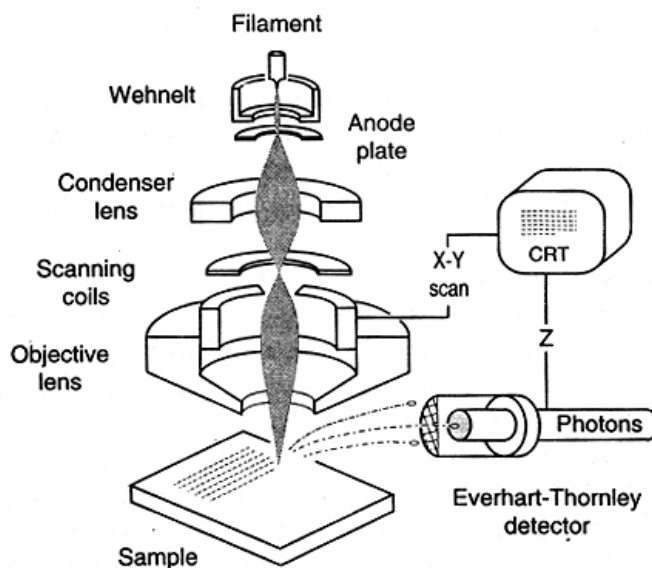
การแยกของกล้องจุลทรรศน์ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น λ_e ของอิเล็กตรอน ดังนี้

$$\text{การแยก} = \frac{k_1 \lambda_e}{NA} \quad (13)$$

โดย k_1 และ NA เป็นค่าคงตัวที่ขึ้นกับระบบของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ธรรมดาที่ใช้สมบัติของแสง มีค่า k_1 และ NA เท่ากับหนึ่ง แต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีค่า NA ประมาณ 0.01 เมื่อพิจารณาจากสมการ (11) จะเห็นว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีค่าการแยกมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดามาก เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอน 10^4 - 10^5 เท่า

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีสองประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในงานวิจัยนี้ใช้ SEM ในการศึกษาพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวของฟิล์ม จึงจะกล่าวถึงหลักการทำงานของ SEM เท่านั้น



ภาพที่ 12 ส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบหลักของ SEM แสดงดังภาพที่ 12 เมื่อสุบอากาศออกจากเครื่อง SEM เพื่อให้ไม่ให้ลำอิเล็กตรอนชนกับโมเลกุลของก๊าซ ไส้หลอด (filament) จะปล่อยอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงาน 1 - 40 eV ให้เคลื่อนผ่านแผ่นอโนดแล้วถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และใช้เลนส์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic lenses) หรือเลนส์แม่เหล็ก (magnetic lenses) โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนสารตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพ ขดลวดสแกน (scanning coil) มีหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปในระนาบ XY ในลักษณะเดียวกับจอโทรทัศน์ เพื่อสแกนบริเวณที่ต้องการจะถ่ายภาพ เมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาดังต่อไปนี้

- อิเล็กตรอนที่เข้าชนถูกกระเจิงกลับ (backscatter) ออกจากตัวอย่าง
- อิเล็กตรอนที่เข้าชนถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในตัวอย่าง แล้วมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา
- อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้น โดยจะปลดปล่อยโฟตอนหรือรังสีเอกซ์ออกมา

ตัวตรวจวัด (detector) จะตรวจจับสัญญาณที่ออกมาจากสารตัวอย่าง แล้วแสดงความเข้มของสัญญาณที่ได้บนจอภาพ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดส่วนใหญ่จะใช้อิเล็กตรอนชุดที่สองเป็นสัญญาณที่ใช้ในการสร้างภาพถ่าย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุที่ใช้เตรียมฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางซิลิกอน เพื่อนำมาใช้ในการวิจัยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุ	ขนาด	สูตรทางเคมี	บริษัทที่ผลิต	ความบริสุทธิ์
ซิลิกอนแบบแผ่น	เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.620 cm หนา 0.318 cm	Si	Kurt J. Lesker Company	99.9%
แผ่นควอทซ์	$1.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$	SiO ₂	-	-

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิทัล
2. เมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol)
3. ที่ตัดกระจก
4. ถังมือยาง
5. เครื่องซั่งอย่างละเอียด SATORIUS รุ่น AC 2105 จอแสดงผลแบบ black graphic LCD ดังภาพที่ 13 ผลิตโดยบริษัท SATORIUS GMBH GOTTINGEN ประเทศเยอรมัน ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 230 กรัม ความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม ความตํ่าศักย์ 220 V 50 Hz



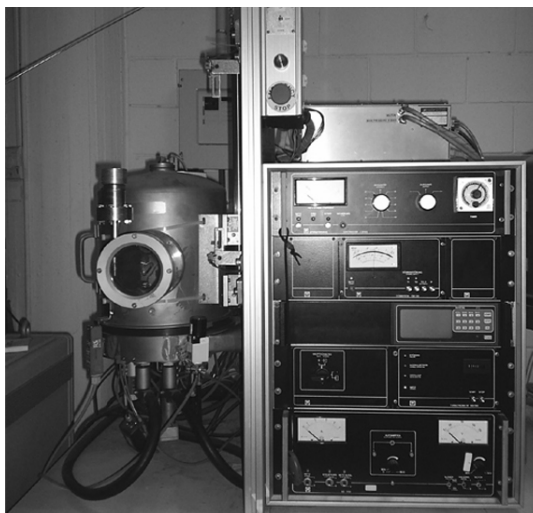
ภาพที่ 13 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

6. เตาเผาความร้อนสูง NEY รุ่น 2-525 ดังภาพที่ 14 ผลิตโดยบริษัท NEY ประเทศสหรัฐอเมริกา กำลังไฟฟ้า 1500 W กระแสสูงสุด 6.8 A ขอบเขตอุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}$ ความแม่นยำอุณหภูมิ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $0^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}/\text{min}$



ภาพที่ 14 เตาเผาความร้อนสูง

7. เครื่องเคลือบฟิล์ม UNIVEX รุ่น 300 ดังภาพที่ 15 ผลิตโดยบริษัท LEYBOLD-HERAEUS GMBH GOTTINGEN ประเทศเยอรมัน สามารถเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง



ภาพที่ 15 เครื่องเคลือบฟิล์ม UNIVEX 300

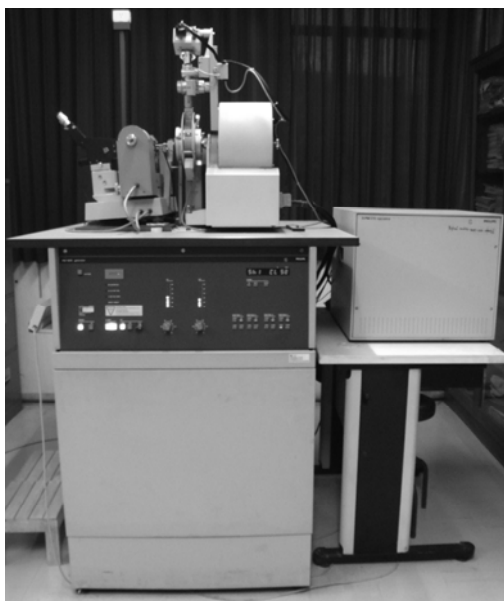
อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิตอล
2. ชุดเครื่องชั่งอย่างละเอียด SATORIUS รุ่น AC 2105

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง

เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รุ่น PW 3710 ดังภาพที่ 16 ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์ ประกอบด้วย

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



ภาพที่ 16 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มตัวอย่าง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-6480 LV ดังภาพที่ 17 ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น ความต่างศักย์ 220 VAC 50 Hz 3.0 kVA กำลังขยาย 18 – 300,000 เท่า



ภาพที่ 17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

วิธีเคลือบฟิล์มและการวิเคราะห์

การเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางซิลิกอนบนแผ่นควอตซ์ ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นควอตซ์ด้วยน้ำยาล้างจาน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม ทำความสะอาดด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำไปชั่งหามวลก่อนเคลือบ m_1 พร้อมทั้งวัดความกว้าง a และความยาว b ของแผ่นควอตซ์

2. วางแผ่นควอตซ์ที่เตรียมได้บนที่วางแผ่นรองรับของเครื่องเคลือบฟิล์ม แล้วทำการสูบอากาศออกจากเครื่องเคลือบฟิล์ม จนกระทั่งภายในแชมเบอร์เหลือความดันประมาณ 2×10^{-5} mbar

3. ปลดปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ จนกระทั่งภายในแชมเบอร์มีความดันประมาณ 8×10^{-3} mbar

4. เคลือบฟิล์มด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงหรือวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่างกัน 3 ค่า คือ 100, 150, และ 200 W ที่กำลังไฟฟ้าแต่ละค่าจะใช้เวลาเคลือบต่างกัน 5 ช่วง คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง

5. ชั่งหามวลหลังเคลือบ m_2 เพื่อคำนวณหาความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม

6. นำฟิล์มตัวอย่างไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง

7. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มตัวอย่าง

การศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

เมื่อฟิล์มที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ จะคำนวณความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R ได้ดังนี้

$$th = \frac{m_2 - m_1}{ab \times \rho_{Si}} = \frac{\Delta m}{ab \times \rho_{Si}} \quad (14)$$

และ
$$R = \frac{th}{t} \quad (15)$$

เมื่อ m_1 และ m_2 คือ มวลของแผ่นควอตซ์ก่อนและหลังเคลือบฟิล์ม ตามลำดับ
 a และ b คือ ความกว้างและความยาวของแผ่นควอตซ์
 ρ_{Si} คือ ความหนาแน่นของซิลิกอน มีค่าเท่ากับ 2.33 g/cm^3
 และ t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่างด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีรายละเอียดดังนี้

1. ใส่แผ่นฟิล์มตัวอย่างในเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้
 - 2.1 มุมเริ่มต้น 20.00 องศา และ มุมสุดท้าย 80.00 องศา
 - 2.2 ใช้รังสีเอกซ์ชนิดส่องกวาดต่อเนื่อง ความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 25 mA
 - 2.3 ใช้เป้าทองแดง ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ $\lambda_{Cu-K\alpha} = 0.1541 \text{ nm}$
 - 2.4 ช่องเลี้ยวออก 0.25 องศา ช่องเลี้ยวเข้า 0.1 องศา
3. นำข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาคำนวณขนาดเกรน D_{hkl} ของโครงสร้างจุลภาค จากสมการ (11)

สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย

1. เคลือบฟิล์มตัวอย่าง ศึกษาผล ความหนา อัตราการเคลือบ และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง ที่หน่วยวิจัยและปฏิบัติการสารตัวนำยิ่งยวดและพอลิเมอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ศึกษาเลดทึบพารามิเตอร์ และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง ที่ห้องปฏิบัติการวิทยารังสีเอกซ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

3. ศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์ ศูนย์เครื่องมือส่วนกลาง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระยะเวลาการทำวิจัย

ปีการศึกษา 2548 – ปีการศึกษา 2550

ผลและวิจารณ์

ผลการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางซิลิกอนบนแผ่นควอตซ์ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอร์และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 3 ค่า คือ 100, 150 และ 200 W เป็นเวลาต่างกัน 5 ช่วง คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3 ชั่วโมง ดังนั้น จึงได้ฟิล์มตัวอย่างรวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ tXP แทนชื่อฟิล์ม

เมื่อ	t	แทนเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม
	X	แทนวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม คือ D แทนวิธีดีซีสปัตเตอร์ และ R แทนวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์
และ	P	แทนกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ซึ่งเลข 10, 15 และ 20 แทนกำลังไฟฟ้า 100, 150 และ 200 W ตามลำดับ

ผลการศึกษามวล ความหนา และอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

ความกว้าง a ความยาว b พื้นที่ ab และมวลก่อนเคลือบ m_1 ของแผ่นควอตซ์ได้แสดงในตารางที่ 2 ภาพที่ 18 แสดงมวลของฟิล์มต่อพื้นที่ $\Delta m/ab$ เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ใช้เคลือบและกำลังที่เคลือบจะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาในการเคลือบฟิล์มนานขึ้น และที่ กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น มวลของฟิล์มต่อพื้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีดีซีสปัตเตอร์จะมีค่าสูงกว่าวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์

ความหนาของฟิล์ม t_h และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ สามารถคำนวณได้จากมวลของฟิล์ม Δm โดยใช้สมการ (12) และ (13) ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 2 และภาพที่ 19 ซึ่งจะเห็นว่าความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบสูงขึ้น

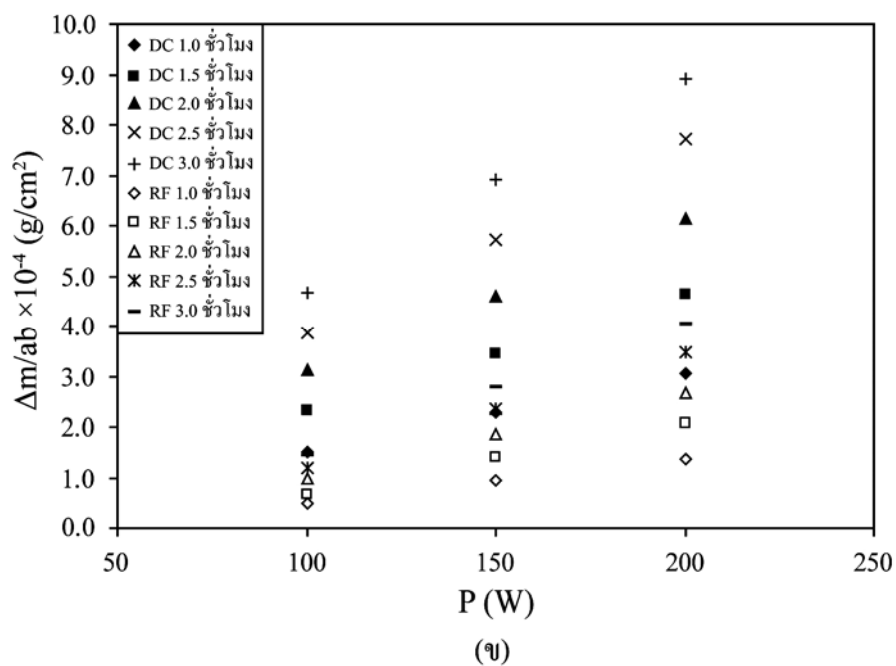
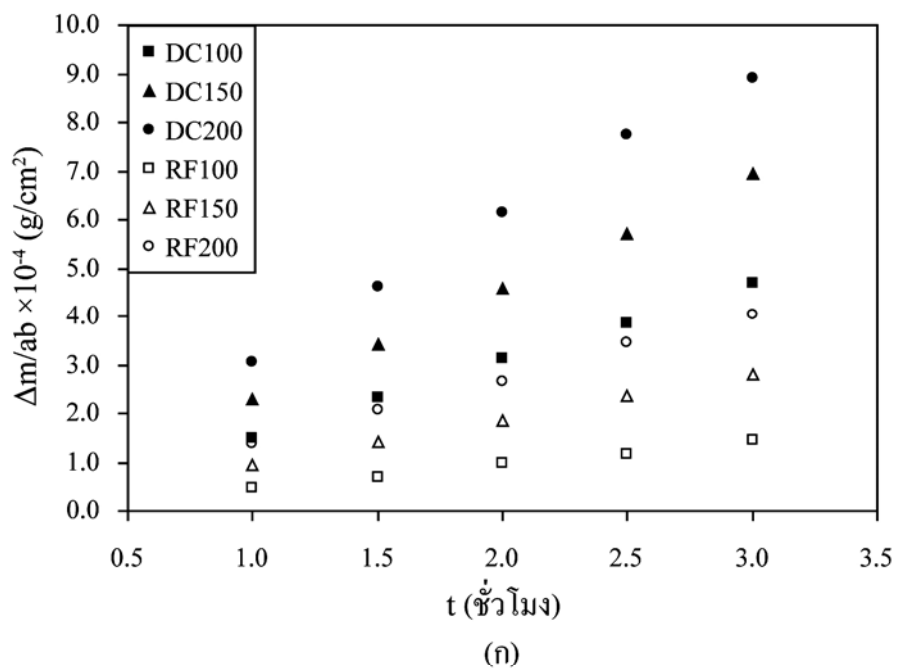
ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบได้แสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 2 ชื่อฟิล์มตัวอย่าง เวลา t กำลังไฟฟ้า P ที่ใช้เคลือบฟิล์ม ความกว้าง a ความยาว b มวล m_1 ก่อนเคลือบ มวล m_2 หลังเคลือบ ความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย R_{av}

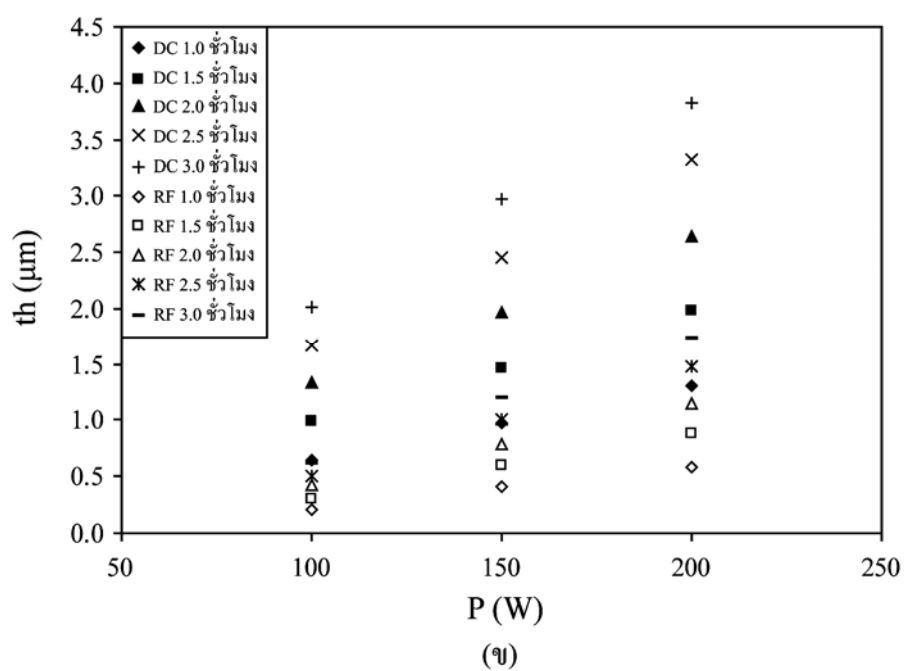
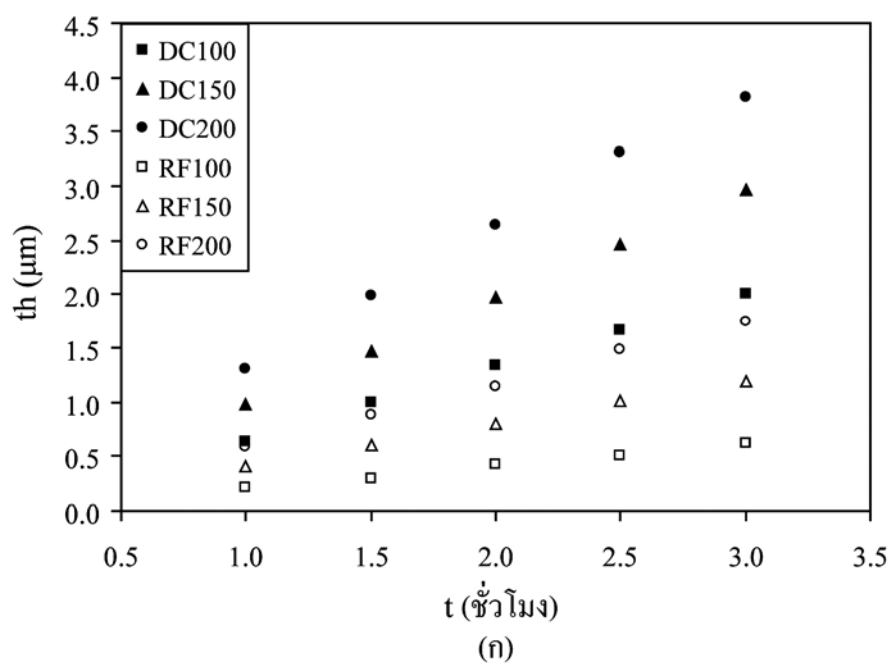
ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม tXP	เวลา t (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า P (W)	a (cm)	b (cm)	ab (cm ²)	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m/ab$ (g/cm ²)	th (μm)	R (nm/min)	R_{av} (nm/min)
1.1	1.0D10	1.0	100	1.520	2.010	3.055	0.8139	0.8144	0.0005	1.50×10^{-4}	0.64	10.72	11.02
1.2	1.5D10	1.5		1.525	2.008	3.062	0.8158	0.8165	0.0007	2.31×10^{-4}	0.99	11.02	
1.3	2.0D10	2.0		1.516	2.012	3.050	0.8126	0.8135	0.0009	3.11×10^{-4}	1.34	11.13	
1.4	2.5D10	2.5		1.524	1.998	3.045	0.8112	0.8124	0.0012	3.87×10^{-4}	1.66	11.07	
1.5	3.0D10	3.0		1.522	2.004	3.050	0.8125	0.8140	0.0014	4.68×10^{-4}	2.01	11.16	
1.6	1.0D15	1.0	150	1.518	2.014	3.057	0.8145	0.8151	0.0007	2.27×10^{-4}	0.98	16.27	16.38
1.7	1.5D15	1.5		1.520	1.998	3.037	0.8090	0.8101	0.0010	3.42×10^{-4}	1.47	16.33	
1.8	2.0D15	2.0		1.524	2.014	3.069	0.8177	0.8191	0.0014	4.59×10^{-4}	1.97	16.41	
1.9	2.5D15	2.5		1.516	2.010	3.047	0.8118	0.8135	0.0017	5.72×10^{-4}	2.46	16.38	
1.10	3.0D15	3.0		1.510	2.012	3.038	0.8094	0.8115	0.0021	6.93×10^{-4}	2.97	16.52	
1.11	1.0D20	1.0	200	1.516	2.012	3.050	0.8126	0.8135	0.0009	3.05×10^{-4}	1.31	21.84	21.85
1.12	1.5D20	1.5		1.522	1.998	3.041	0.8101	0.8115	0.0014	4.63×10^{-4}	1.99	22.08	
1.13	2.0D20	2.0		1.518	2.018	3.063	0.8161	0.8180	0.0019	6.14×10^{-4}	2.64	21.97	
1.14	2.5D20	2.5		1.520	2.014	3.061	0.8155	0.8179	0.0024	7.73×10^{-4}	3.32	22.11	
1.15	3.0D20	3.0		1.524	2.010	3.063	0.8160	0.8188	0.0027	8.90×10^{-4}	3.82	21.23	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

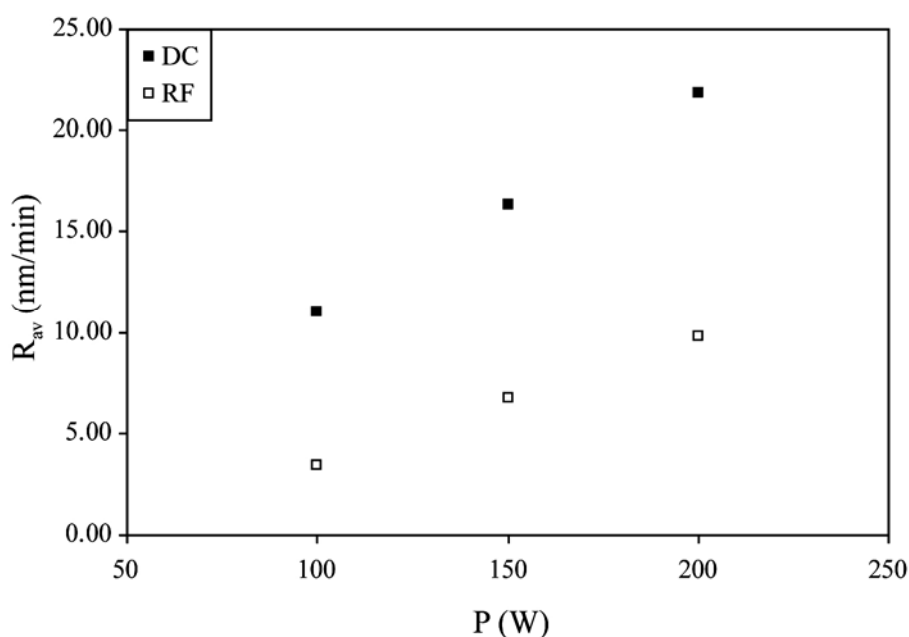
ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม tXP	เวลา t (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า P (W)	a (cm)	b (cm)	ab (cm ²)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	Δm (g)	Δm/ab (g/cm ²)	th (μm)	R (nm/min)	R _{av} (nm/min)
1.16	1.0R10	1.0	100	1.520	2.012	3.058	0.8147	0.8149	0.0001	0.48×10^{-4}	0.20	3.41	3.40
1.17	1.5R10	1.5		1.524	1.998	3.045	0.8112	0.8114	0.0002	0.68×10^{-4}	0.29	3.24	
1.18	2.0R10	2.0		1.516	2.004	3.038	0.8093	0.8096	0.0003	0.99×10^{-4}	0.42	3.54	
1.19	2.5R10	2.5		1.510	2.014	3.041	0.8102	0.8105	0.0004	1.18×10^{-4}	0.51	3.37	
1.20	3.0R10	3.0		1.518	2.010	3.051	0.8128	0.8133	0.0004	1.44×10^{-4}	0.62	3.43	
1.21	1.0R15	1.0	150	1.516	2.012	3.050	0.8126	0.8129	0.0003	0.95×10^{-4}	0.41	6.78	6.69
1.22	1.5R15	1.5		1.510	2.018	3.047	0.8118	0.8122	0.0004	1.40×10^{-4}	0.60	6.69	
1.23	2.0R15	2.0		1.520	2.014	3.061	0.8155	0.8161	0.0006	1.85×10^{-4}	0.79	6.60	
1.24	2.5R15	2.5		1.516	2.010	3.047	0.8118	0.8125	0.0007	2.35×10^{-4}	1.01	6.73	
1.25	3.0R15	3.0		1.522	1.998	3.041	0.8101	0.8110	0.0008	2.79×10^{-4}	1.20	6.65	
1.26	1.0R20	1.0	200	1.518	2.010	3.051	0.8128	0.8133	0.0004	1.37×10^{-4}	0.59	9.78	9.75
1.27	1.5R20	1.5		1.524	2.012	3.066	0.8169	0.8175	0.0006	2.07×10^{-4}	0.89	9.86	
1.28	2.0R20	2.0		1.516	2.018	3.059	0.8150	0.8158	0.0008	2.67×10^{-4}	1.14	9.54	
1.29	2.5R20	2.5		1.510	2.014	3.041	0.8102	0.8112	0.0011	3.46×10^{-4}	1.49	9.91	
1.30	3.0R20	3.0		1.522	2.010	3.059	0.8150	0.8162	0.0012	4.05×10^{-4}	1.74	9.65	



ภาพที่ 18 มวลของฟิล์มต่อพื้นที่ที่เคลือบที่ (ก) เวลา t (ข) กำลังไฟฟ้า P



ภาพที่ 19 ความหนาของฟิล์มที่ (ก) เวลา t (ข) กำลังไฟฟ้า P



ภาพที่ 20 อัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ยที่ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ

ภาพที่ 20 แสดงอัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ย R_{av} กับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ จะเห็นว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น อัตราการเคลือบฟิล์มเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเคลือบด้วยวิธีดีซี สปีดเตอร์ริงมีอัตราการเคลือบเฉลี่ยที่ กำลังไฟฟ้า 100, 150 และ 200 W คือ 11.02, 16.38 และ 21.85 nm/min ตามลำดับ และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริงมีอัตราการเคลือบเฉลี่ยที่ กำลังไฟฟ้า 100, 150 และ 200 W คือ 3.40, 6.69 และ 9.75 nm/min ตามลำดับ

ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง

นำฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่เคลือบได้ในตารางที่ 2 มาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ที่กำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 1.0, 1.5 และ 2.0 ชั่วโมง มาแบ่งเป็น 6 ชุด ชุดที่ 1 ไม่อบด้วยความร้อน ชุดที่ 2 – 5 อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ชุดที่ 6 ฟิล์ม

ตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ

กลุ่มที่ 2 ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิลิกอน โดยนำฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 100 และ 150 W เป็นเวลา 3.0 และ 2.0 ชั่วโมง ตามลำดับ ไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

โดยใช้สัญลักษณ์ $tXP(T)t_u$ แทนชื่อฟิล์มตัวอย่าง ดังตารางที่ 3

เมื่อ t, X, P เป็นสัญลักษณ์ดังตารางที่ 2

T แทนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์ม ซึ่ง NA แทนฟิล์มที่ไม่อบด้วยความร้อน ตัวเลข 07, 08, 09 และ 10 แทนอุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 °C ตามลำดับ

และ t_u แทนเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม ซึ่งเลข 5, 10 และ 20 แทนเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ

เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มไปศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของฟิล์มตัวอย่างดังภาพที่ 21 – 27

ตารางที่ 3 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาได้จากระนาบ (111) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง โดย $\Delta(2\theta) = 2\theta - 2\theta_s$ ซึ่งเป็นผลต่างของมุม 2θ ที่ได้จากการทดลองกับมุม $2\theta_s$ ที่ได้ตารางมาตรฐานของซิลิกอน โดย $2\theta_s = 28.502^\circ$ ดังตารางผนวกที่ ข1 I เป็นความเข้มของฟลักการเลี้ยวเบนจากระนาบ (111) และ B เป็นความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (FWHM) ของระนาบ (111)

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างกลุ่มที่ 1 พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มตัวอย่างหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้น จะมีความเข้มสูงขึ้นและจะมีค่า B ลดลง แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และฟิล์มตัวอย่างที่ไม่อบด้วยความร้อนมีฟลักการเลี้ยวเบนเล็กน้อย แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างเป็นอะมอร์ฟิสมากกว่าเป็นผลึก เมื่อใช้เวลาในการเคลือบและอุณหภูมิอบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง และ B ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง

มีค่าน้อยกว่าวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอร์ริงมีความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ดังภาพที่ 28 เมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ออบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นจะมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนจากระนาบ (111) สูงขึ้นและค่า B จะลดลง ดังภาพที่ 30 แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าสูงกว่ามีความเป็นผลึกมากกว่า

เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่อบนานขึ้นจะมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนจากระนาบ (111) สูงขึ้น ดังภาพที่ 31 แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่อบนานกว่ามีความเป็นผลึกมากกว่า

ระยะระหว่างระนาบ d_{111} ซึ่งหาได้จากกฎของแบรกก์ในสมการ (8) ได้แสดงในตารางที่ 3 ในที่นี้ใช้ค่า $\lambda_{\text{Cu-K}\alpha} = 0.1541 \text{ nm}$

แลตทิซพารามิเตอร์ a ที่คำนวณจากสมการ (9) ได้แสดงในตารางที่ 3 โดย $\Delta a = a - a_s$ เป็นผลต่างของค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a ที่ได้จากการทดลองกับค่าพารามิเตอร์มาตรฐาน $a_s = 0.54199 \text{ nm}$ ดังตารางผนวกที่ ข1 โดยซิลิกอนมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า (FCC)

ขนาดเกรน D_{111} ของฟิล์มตัวอย่างที่คำนวณจากสมการ (11) ได้แสดงในตารางที่ 3 เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มตัวอย่างหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการเคลือบและอุณหภูมิอบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอร์ริงมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง ดังภาพที่ 29 เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบฟิล์มตัวอย่างเท่ากัน ฟิล์มตัวอย่างที่อบนานขึ้นจะมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น ดังภาพที่ 31

ตัวอย่างการคำนวณระยะระหว่างระนาบ (111) แลตทิซพารามิเตอร์ และขนาดเกรนของฟิล์มได้แสดงในภาคผนวก ค

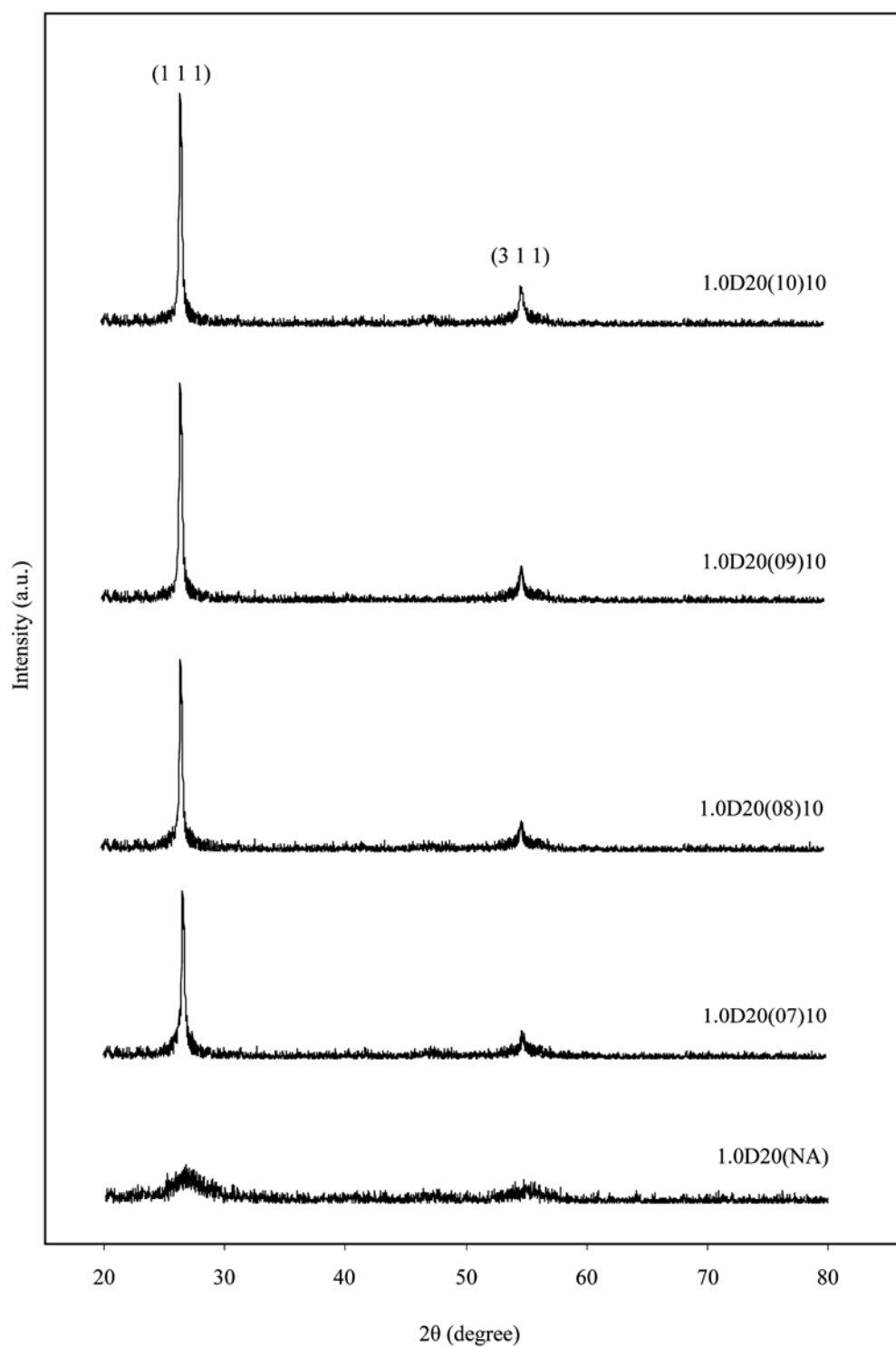
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาได้จากระนาบ (111) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง $\text{EXP}(T)t_a$ โดย $\Delta(2\theta) = 2\theta - 2\theta_s$

และ $\Delta a = a - a_s$

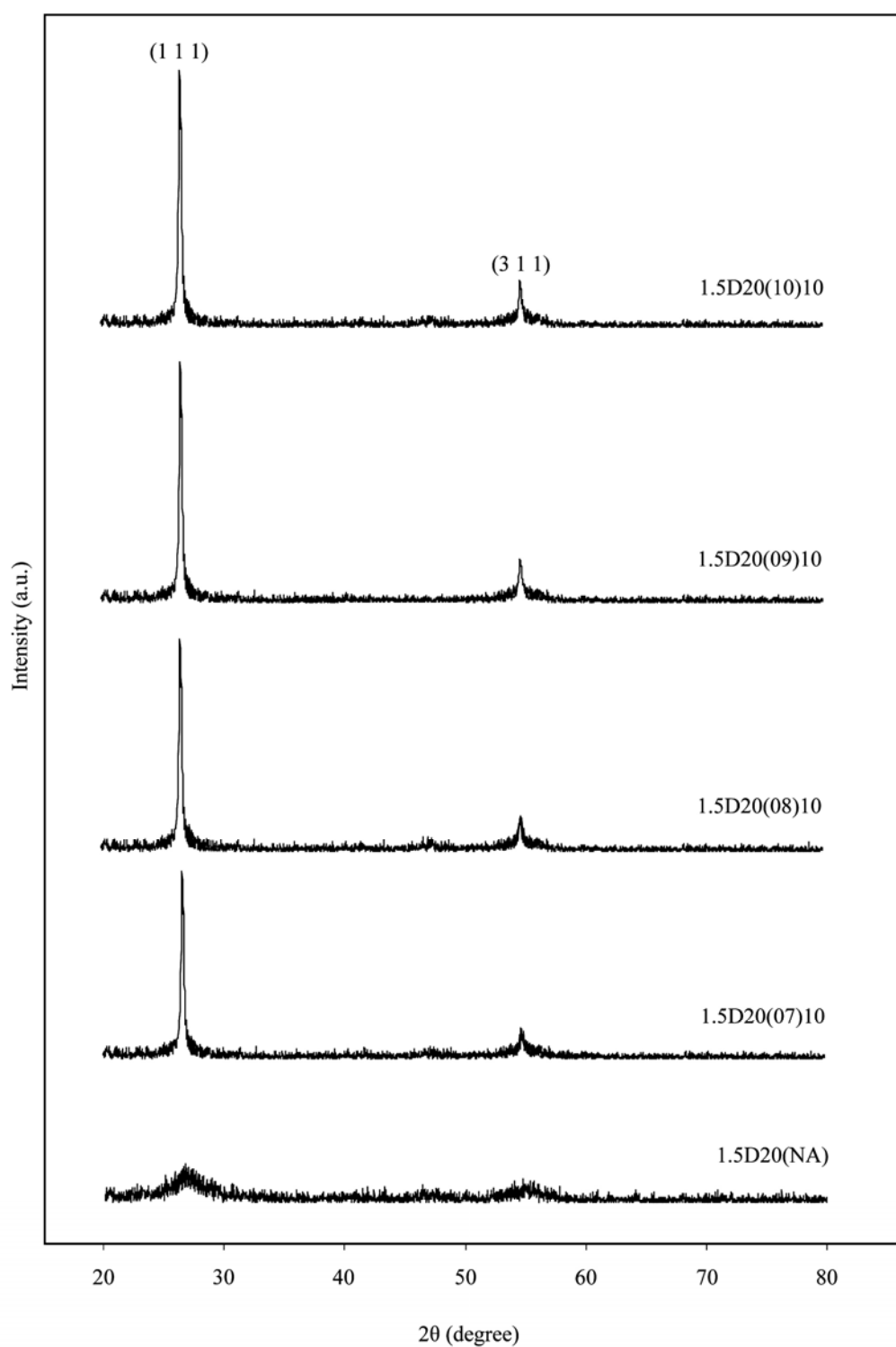
กลุ่มตัวอย่าง	ชื่อฟิล์มตัวอย่าง	T (°C)	t_a (ชั่วโมง)	มุม 2θ (°)	$\Delta(2\theta)$ (°)	I (a.u.)	B (radian)	d_{111} (nm)	a (nm)	Δa (nm)	D_{111} (nm)
กลุ่มที่ 1	1.0D20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0D20(07)10	700	10	28.47	-0.032	823	6.977×10^{-4}	0.3133	0.54272	0.00073	202.79
	1.0D20(08)10	800		28.44	-0.062	860	6.975×10^{-4}	0.3137	0.54328	0.00129	202.83
	1.0D20(09)10	900		28.50	-0.002	884	6.973×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	202.92
	1.0D20(10)10	1000		28.46	-0.042	900	6.972×10^{-4}	0.3134	0.54291	0.00092	202.93
	1.5D20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5D20(07)10	700	10	28.48	-0.022	832	6.975×10^{-4}	0.3132	0.54253	0.00054	202.85
	1.5D20(08)10	800		28.50	-0.002	874	6.974×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	202.89
	1.5D20(09)5	900	5	28.47	-0.032	784	6.996×10^{-4}	0.3133	0.54272	0.00073	202.25
	1.5D20(09)10	900	10	28.49	-0.012	896	6.972×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	202.94
	1.5D20(09)20	900	20	28.51	0.008	986	6.949×10^{-4}	0.3129	0.54197	-0.00002	203.64
	1.5D20(10)10	1000	10	28.51	0.008	913	6.970×10^{-4}	0.3129	0.54197	-0.00002	203.01
	2.0D20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.0D20(07)10	700	10	28.49	-0.012	850	6.973×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	202.92
	2.0D20(08)10	800		28.48	-0.022	894	6.972×10^{-4}	0.3132	0.54253	0.00054	202.94
	2.0D20(09)10	900		28.51	0.008	921	6.970×10^{-4}	0.3129	0.54197	-0.00002	203.01
	2.0D20(10)10	1000		28.50	-0.002	932	6.969×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	203.03

ตารางที่ 3 (ต่อ)

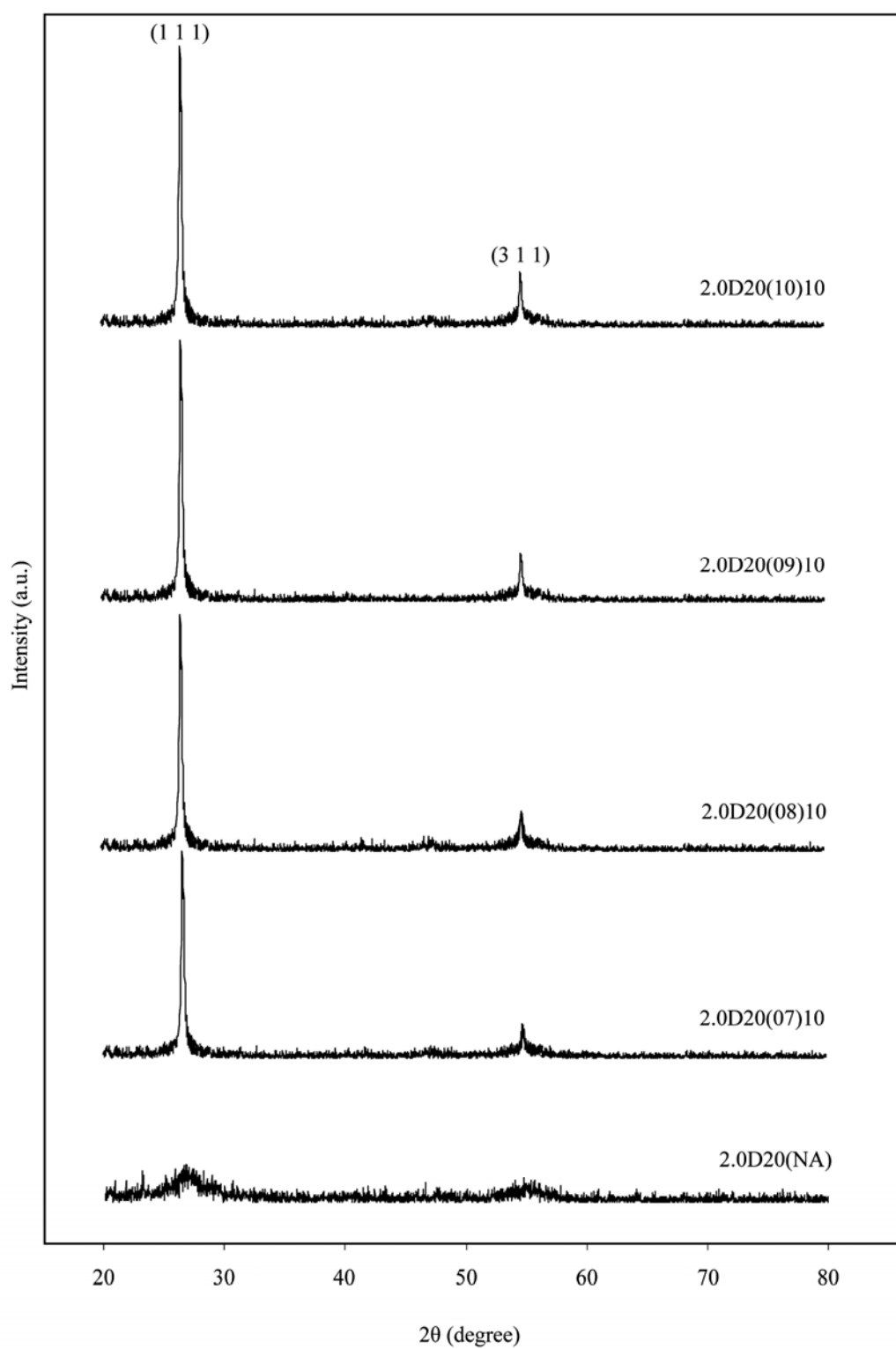
กลุ่มตัวอย่าง	ชื่อฟิล์มตัวอย่าง	T (°C)	t _a (ชั่วโมง)	มุม 2θ (°)	Δ(2θ) (°)	I (a.u.)	B (radian)	d ₁₁₁ (nm)	a (nm)	Δa (nm)	D ₁₁₁ (nm)
กลุ่มที่ 1 (ต่อ)	1.0R20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.0R20(07)10	700	10	28.49	-0.012	568	9.687×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	146.07
	1.0R20(08)10	800		28.50	-0.002	582	9.686×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	146.10
	1.0R20(09)10	900		28.48	-0.022	593	9.685×10^{-4}	0.3132	0.54253	0.00054	146.10
	1.0R20(10)10	1000		28.51	0.008	604	9.684×10^{-4}	0.3129	0.54197	-0.00002	146.12
	1.5R20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5R20(07)10	700	10	28.47	-0.012	573	9.684×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	146.12
	1.5R20(08)10	800		28.44	0.008	586	9.682×10^{-4}	0.3129	0.54197	-0.00002	146.15
	1.5R20(09)10	900		28.50	-0.012	600	9.680×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	146.17
	1.5R20(10)10	1000		28.46	-0.002	612	9.678×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	146.21
	2.0R20(NA)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.0R20(07)10	700	10	28.48	-0.002	586	9.679×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	146.20
	2.0R20(08)10	800		28.50	-0.012	597	9.677×10^{-4}	0.3131	0.54235	0.00036	146.22
	2.0R20(09)10	900		28.49	-0.022	611	9.674×10^{-4}	0.3132	0.54253	0.00054	146.26
	2.0R20(10)10	1000		28.51	-0.002	623	9.672×10^{-4}	0.3130	0.54216	0.00017	146.30
กลุ่มที่ 2	3.0D10(09)10	900	10	28.45	-0.052	878	6.987×10^{-4}	0.3136	0.54309	0.00110	202.50
	2.0D15(09)10			28.42	-0.082	889	6.980×10^{-4}	0.3139	0.54365	0.00166	202.69



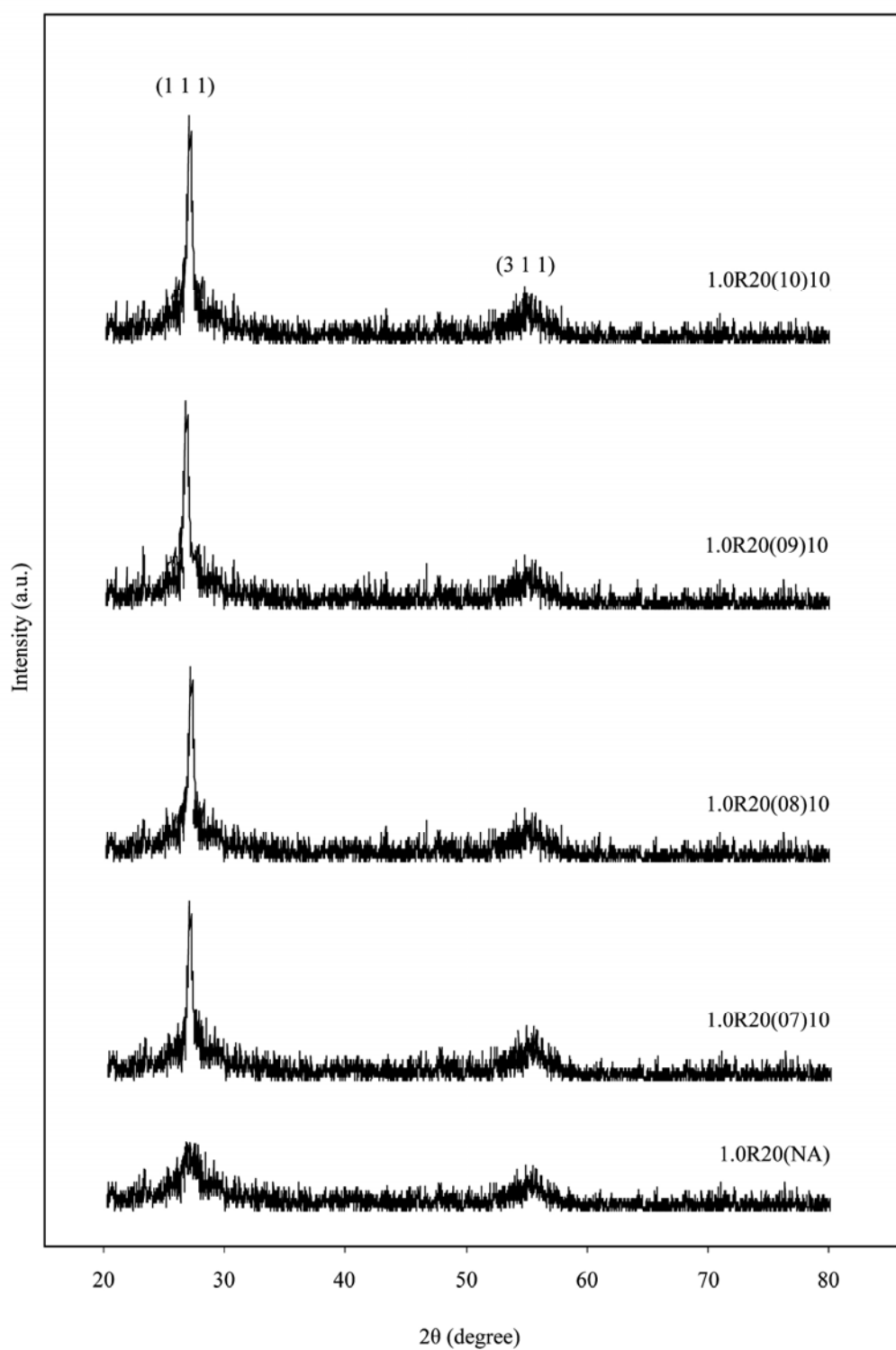
ภาพที่ 21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.0D20(NA) – 1.0D20(10)10



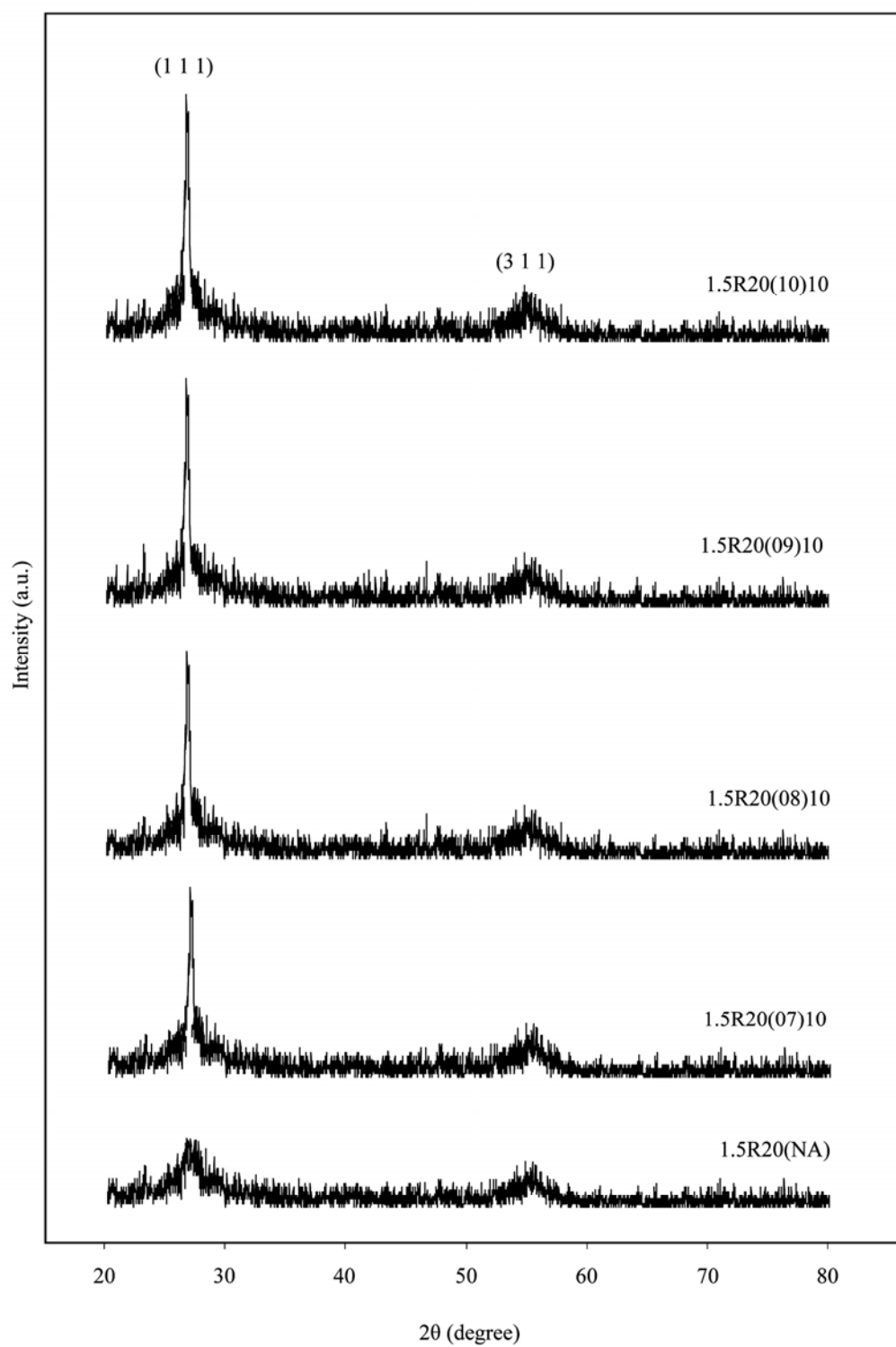
ภาพที่ 22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.5D20(NA) – 1.5D20(10)10



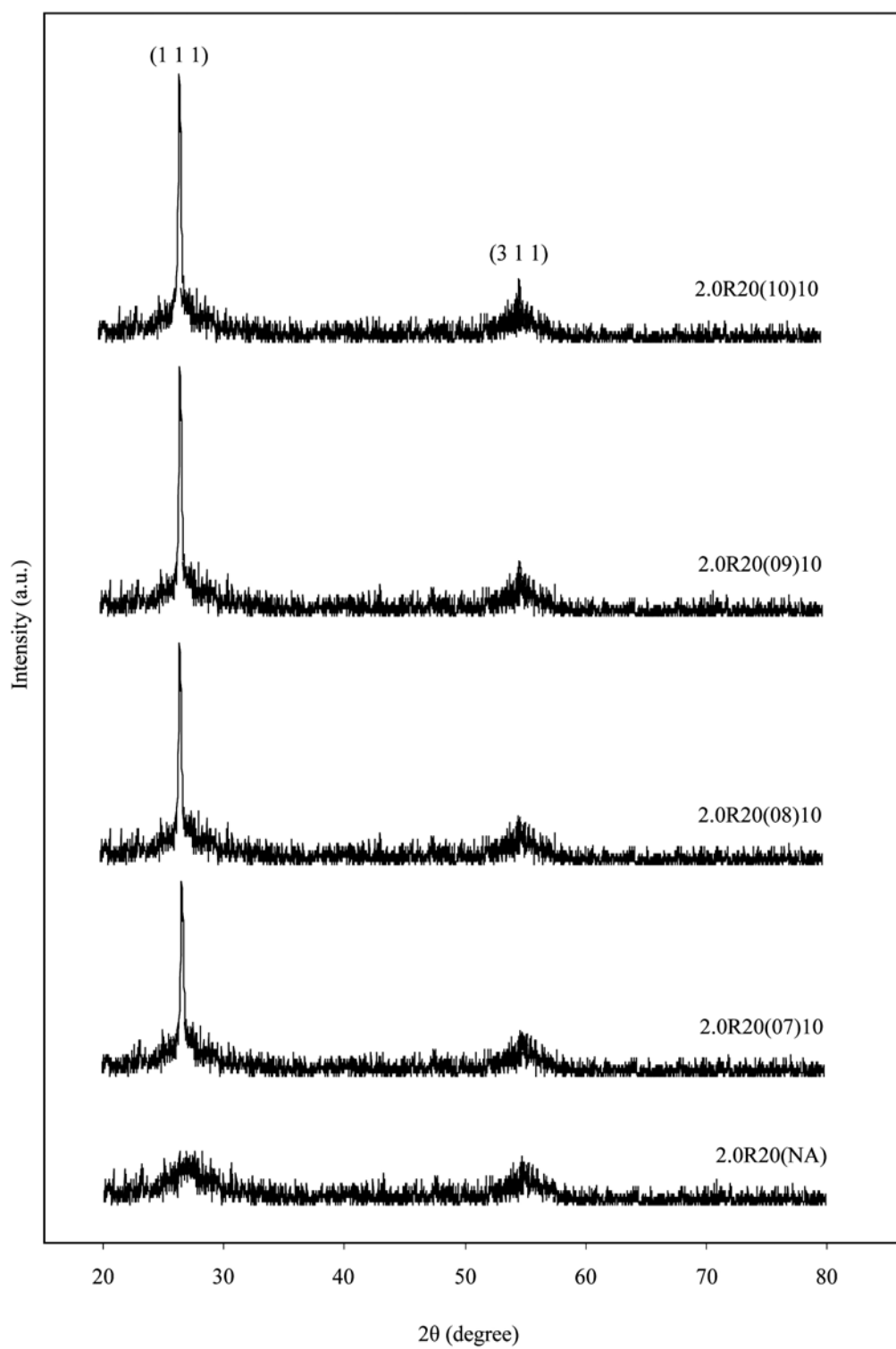
ภาพที่ 23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 2.0D20(NA) – 2.0D20(10)10



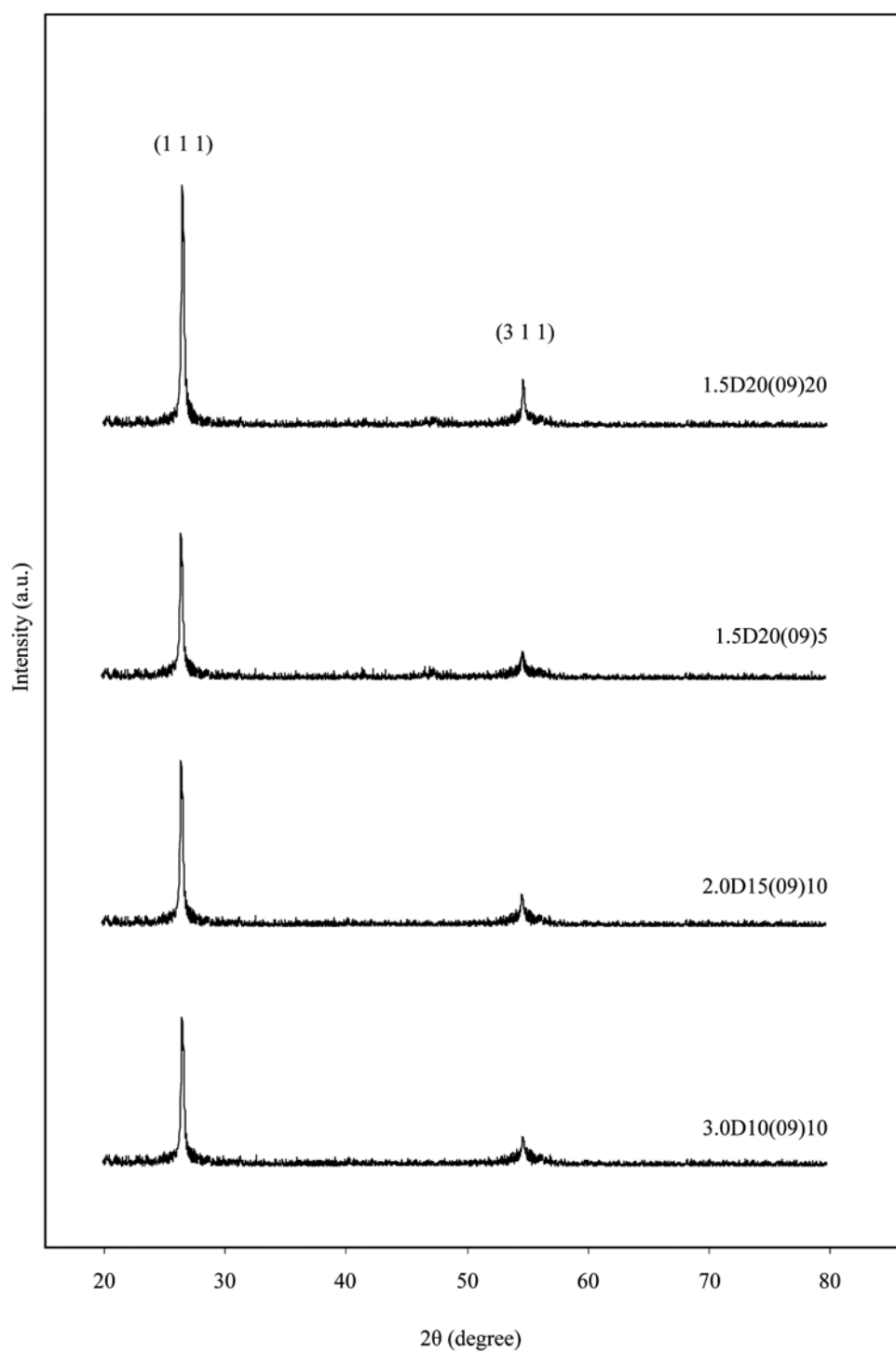
ภาพที่ 24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.0R20(NA) – 1.0R20(10)10



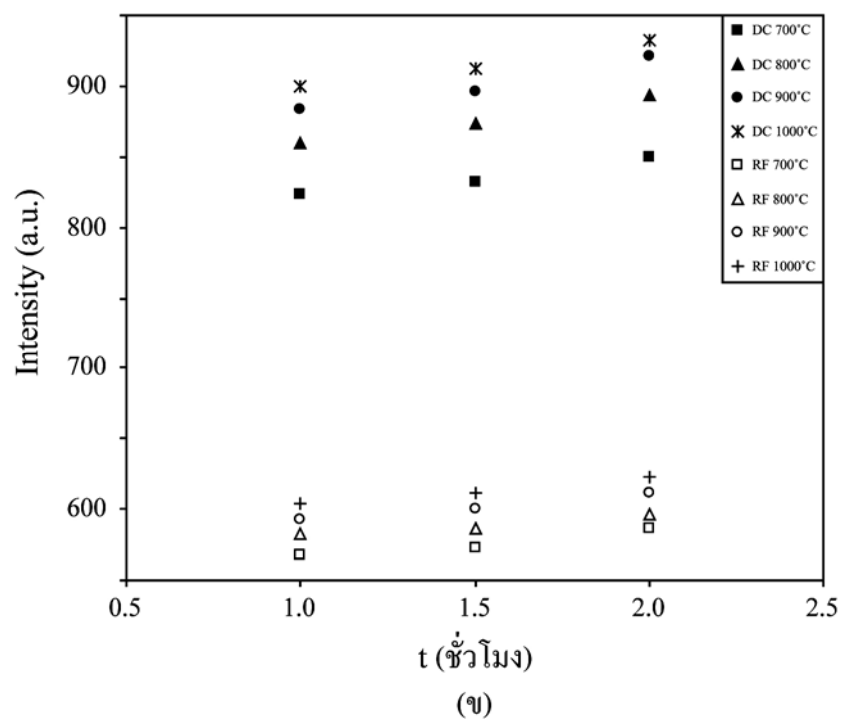
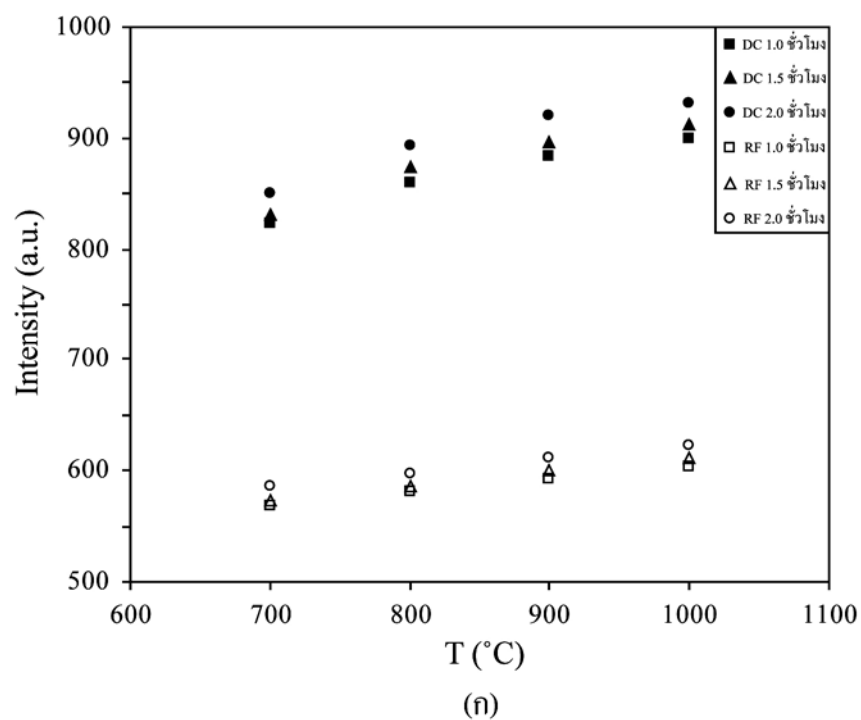
ภาพที่ 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 1.5R20(NA) – 1.5R20(10)10



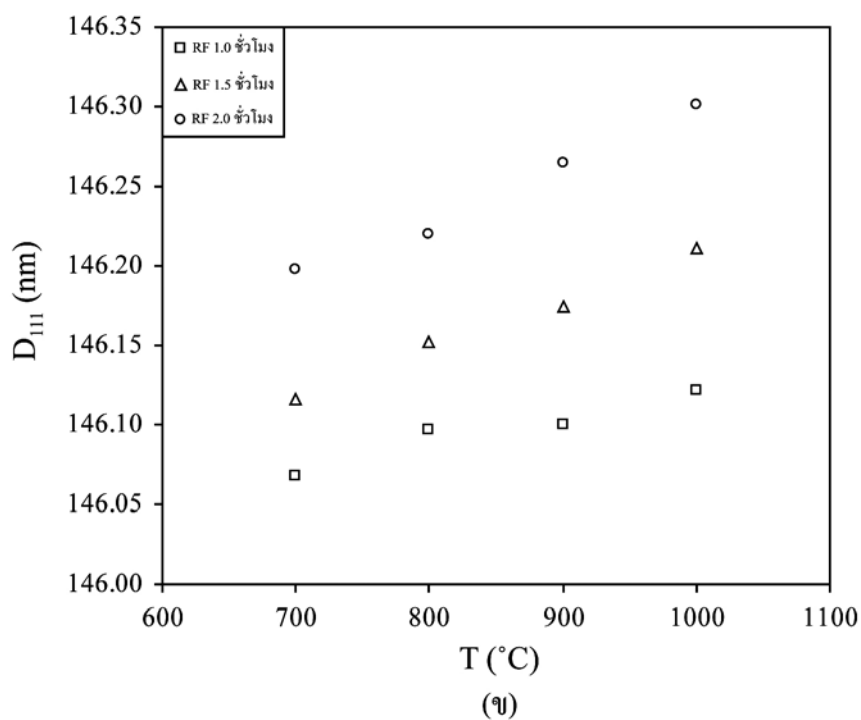
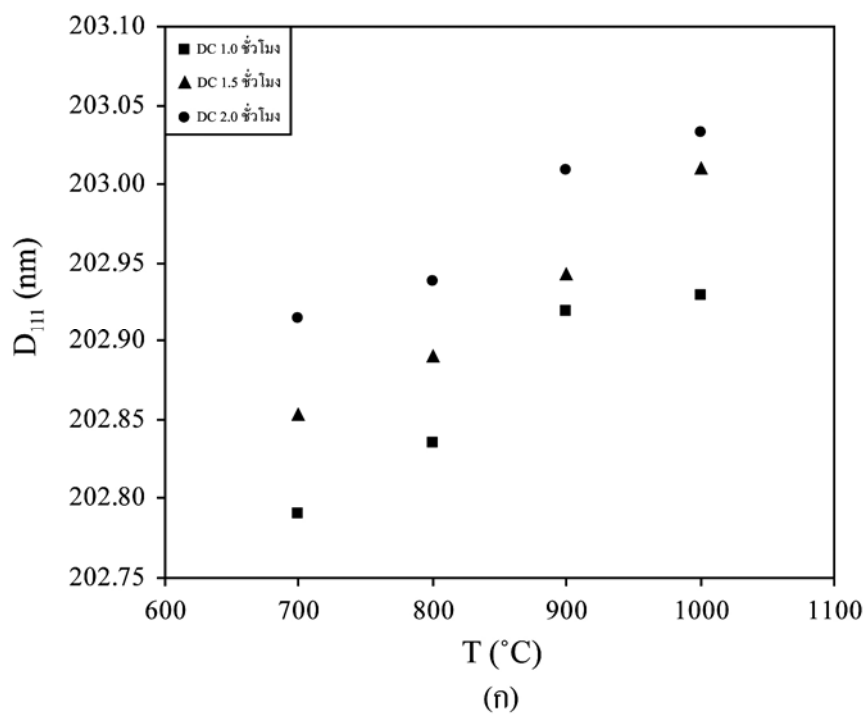
ภาพที่ 26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 2.0R20(NA) – 2.0R20(10)10



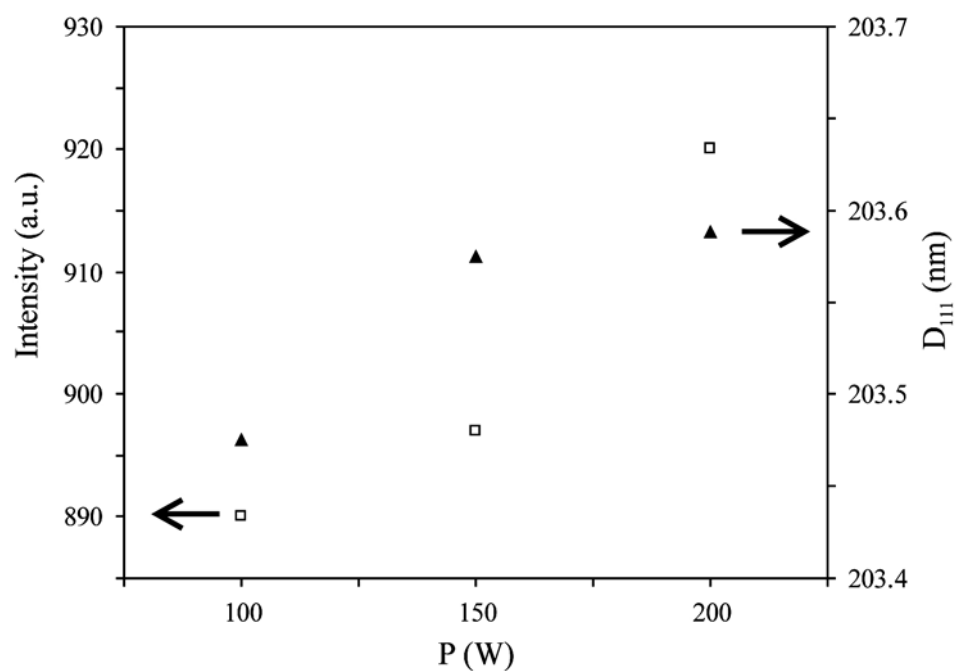
ภาพที่ 27 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่าง 3.0D10(09)10, 2.0D15(09)10, 1.5D20(09)5 และ 1.5D20(09)20



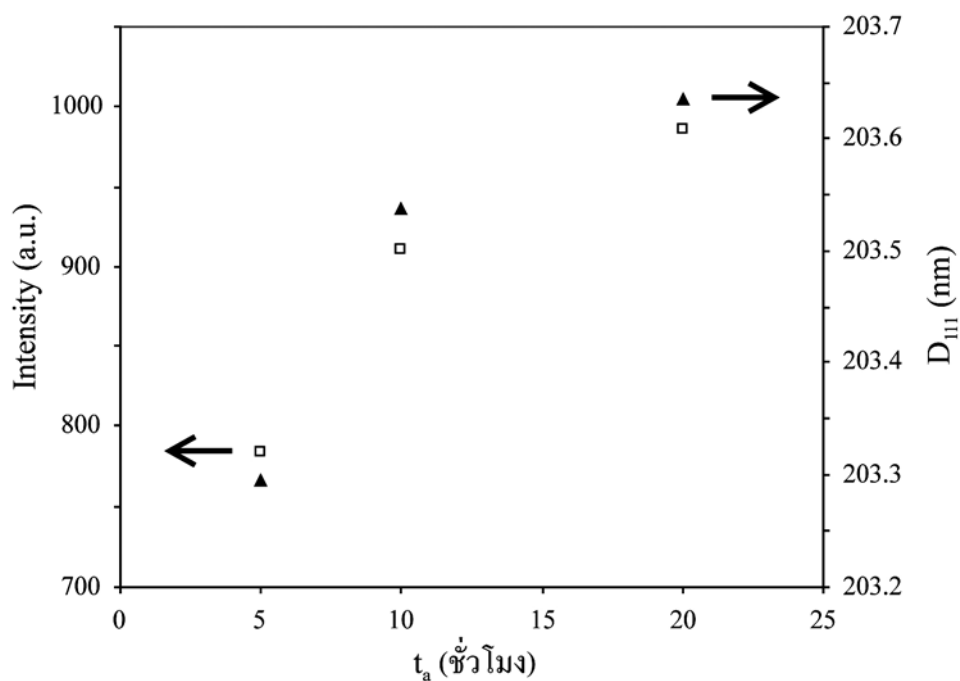
ภาพที่ 28 (ก) ความเข้ม I ที่อุณหภูมิที่ใช้อย่าง T (ข) ความเข้ม I ที่ระยะเวลาที่ใช้เคลือบ t



ภาพที่ 29 ขนาดเกรน D ที่อุณหภูมิที่ใช้อบ T ของฟิล์มที่เคลือบด้วย (ก) วิธีดีซีสเปตเตอริง และ (ข) วิธีอาร์เอฟสเปตเตอริง



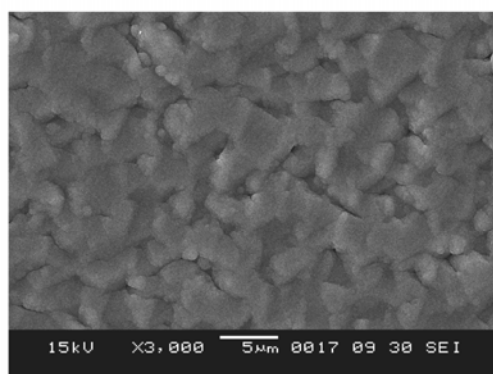
ภาพที่ 30 ความเข้ม I และขนาดเกรน D ของระนาบ (111) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P



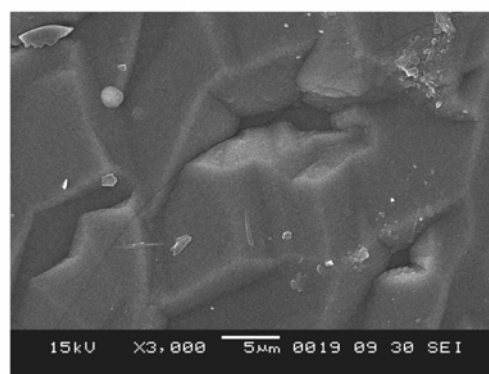
ภาพที่ 31 ความเข้ม I และขนาดเกรน D ของระนาบ (111) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตัวอย่างที่อบเป็นเวลา t_a

ผลการศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

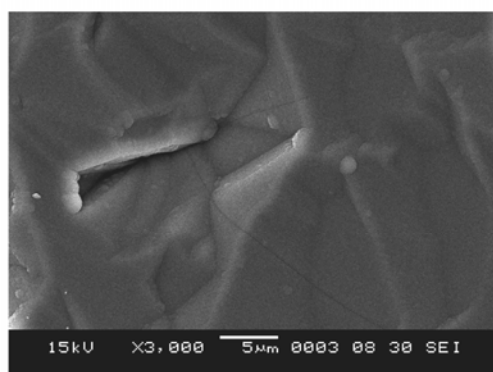
เมื่อนำฟิล์มซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสปีดเตอริง กำลังไฟฟ้า 200 W นาน 1.5 และ 3.0 ชั่วโมง ตามลำดับ ไปศึกษาลักษณะเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ดังภาพที่ 32 และ 33 จะเห็นว่า ฟิล์มตัวอย่างที่ไม่อบด้วยความร้อนมีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัสและมีพื้นผิวขรุขระ ฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยความร้อนมีพื้นผิวเรียบมากขึ้นและมีลักษณะเป็นเกรนขนาดใหญ่ โดยฟิล์มที่อบนานขึ้นมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น



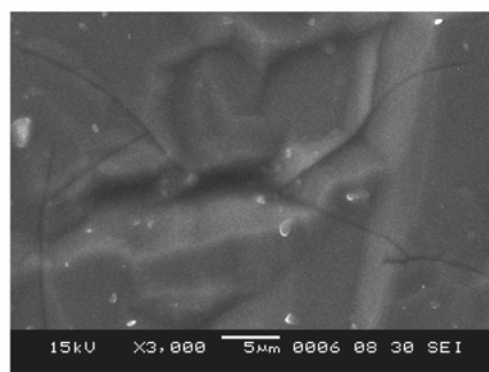
(ก)



(ข)

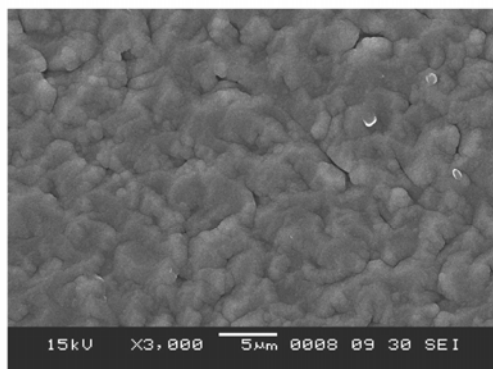


(ค)

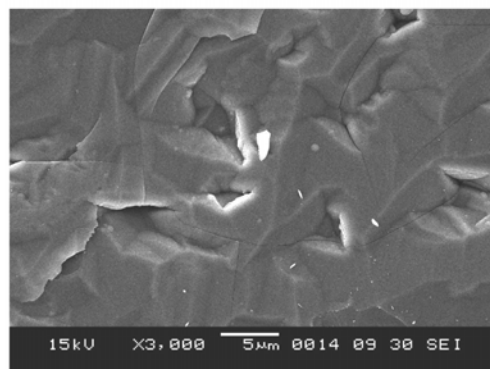


(ง)

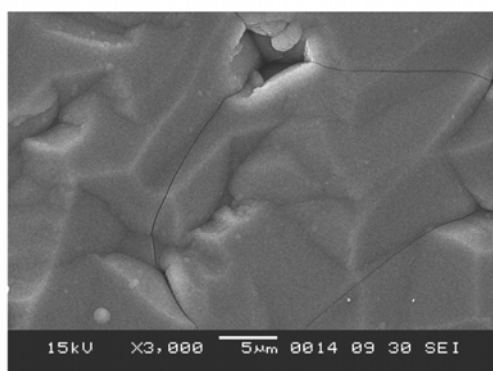
ภาพที่ 32 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 200 W นาน 1.5 ชั่วโมง (ก) ไม่อบด้วยความร้อน (ข) (ค) และ (ง) อบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ



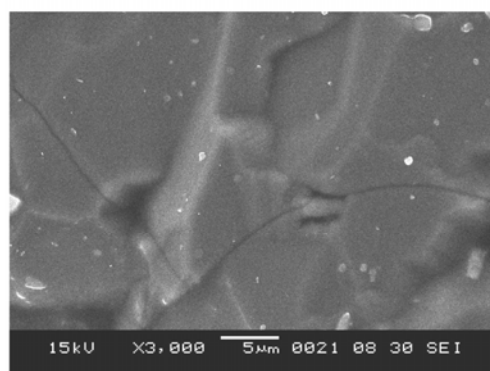
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 33 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ของฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟ สปีดเตอริง ที่กำลังไฟฟ้า 200 W นาน 3.0 ชั่วโมง (ก) ไม่อบด้วยความร้อน (ข) (ค) และ (ง) อบที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ

สรุป

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางซิลิกอนลงบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นควอตซ์ด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง โดยใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.620 cm และหนา 0.318 cm เป็นเป้าสารเคลือบ ก่อนการเคลือบฟิล์มได้สูบอากาศภายในแชมเบอร์ออก จนกระทั่งความดันภายในแชมเบอร์มีค่าประมาณ 2×10^{-5} mbar หลังจากนั้นจึงปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ จนกระทั่งความดันภายในแชมเบอร์มีค่าประมาณ 8×10^{-3} mbar

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม คือ 100, 150 และ 200 W และเวลาในการเคลือบ คือ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 ชั่วโมง นำฟิล์มที่เคลือบมาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W นาน 1.0, 1.5 และ 2.0 ชั่วโมง ฟิล์มตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 แบ่งเป็น 6 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่อบด้วยความร้อน ชุดที่ 2 – 5 อบด้วยความร้อนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 700, 800, 900 และ 1000 °C ตามลำดับ และชุดที่ 6 ซึ่งเป็นฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริง นาน 1.5 ชั่วโมง นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 5 และ 20 ชั่วโมง กลุ่มที่ 2 เป็นฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 100 และ 150 W นาน 3.0 และ 2.0 ชั่วโมง ตามลำดับ นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง สรุปได้ดังนี้

1. ความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์มตัวอย่าง

1.1 เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากัน ฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีค่าความหนาและอัตราการเคลือบมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง

1.2 เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าหรือเวลาในการเคลือบฟิล์มเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มขึ้น

2. แลตทิซพารามิเตอร์ a

การศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิลิกอนซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า พบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีค่า a ระหว่าง 0.54160 – 0.54365 nm และการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงมีค่า a ระหว่าง 0.54197 – 0.54253 nm ซึ่งแตกต่าง จากค่ามาตรฐานเล็กน้อย ($a_s = 0.54199$ nm)

3. ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบ (111) ของฟิล์มตัวอย่าง

3.1 ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากกว่าวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ซึ่งเป็นผลมาจากในระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง ไอออนซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้ทัน จะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพียงส่วนน้อย ทำให้ไอออนในระบบอาร์เอฟสปีดเตอริงมีพลังงานต่ำกว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบเท่านั้น ส่งผลให้อัตราการเคลือบและพลังงานของอะตอมซิลิกอนมีค่าต่ำกว่า อะตอมที่เข้าเคลือบจึงเคลื่อนที่ไปบนผิวและรวมกันเป็นกลุ่มเล็กกว่า ทำให้ความเป็นผลึกในฟิล์มน้อยกว่า

3.2 ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าและเวลาในการเคลือบเท่ากัน เมื่อนำไปอบด้วยความร้อนจะทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้จากมีความเข้มการเลี้ยวเบนที่สูงกว่าฟิล์มที่ไม่อบด้วยความร้อน และฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นหรือใช้เวลาในการอบนานขึ้นมีความเข้มการเลี้ยวเบนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบด้วยความร้อนเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับอะตอมในฟิล์ม ทำให้อะตอมซิลิกอนสามารถแพร่ไปในฟิล์มและรวมตัวกันเกิดเป็นผลึกขึ้น

3.3 ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นมีความเข้มการเลี้ยวเบนที่สูงขึ้น แสดงว่าฟิล์มตัวอย่างมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานของไอออนมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้อะตอมซิลิกอนที่หลุดออกมามีพลังงานสูงขึ้นด้วย และเมื่อตกกระทบผิวฟิล์มอะตอมจะสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวและรวมตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น ความเป็นผลึกจึงเพิ่มขึ้น

4. ขนาดเกรน D_{111} ของระนาบ (111)

เมื่อใช้สมการเชอร์เรอร์คำนวณโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริง ฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปีดเตอริงมีขนาดเกรนระหว่าง 202.79 – 203.64 nm และฟิล์มตัวอย่างที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงมีขนาดเกรนระหว่าง 146.07 – 146.30 nm ขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ออบฟิล์มมีค่าสูงขึ้นหรือเวลาที่ใช้เคลือบฟิล์มนานขึ้น

5. ลักษณะเกรน

การศึกษาลักษณะเกรนของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยความร้อนมีขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าฟิล์มที่ไม่อบด้วยความร้อน และฟิล์มตัวอย่างที่อบนานขึ้นมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณขนาดเกรนของระนาบ (111) โดยใช้สมการเชอร์เรอร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- จรูญติ ต. เทียนประเสริฐ. 2548. การศึกษาสมบัติฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสเป็คเตอรिंग. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พนม กาสรุณ. 2550. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ด้วยลำอิเล็กตรอน, ดีซีและอาร์เอฟสเป็คเตอรिंग. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และ พิษณุ เจริญสมศักดิ์. 2531. รายงานการวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนากล้าเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสเป็คเตอรिंग.
- Abdesselem, S., M.S. Aida, N. Attaf and A. Ouahab. 2006. Growth mechanism of sputtered amorphous silicon thin films. **Physica B**. 373: 33–41.
- Aryal, H. R., S. Adhikari, D. C. Ghimire, H. Uchida, and M. Umeno. 2007. Argon gas dilution effect on the properties of amorphous carbon nitride thin films. **Diamond & Related Materials**. 16: 1269-1272.
- Chan, K. Y. and B. S. Teo. 2006. Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD) investigations of copper thin films prepared by dc magnetron sputtering technique. **Microelectronics Journal**. 37: 1064-1071.
- Chan, K. Y. and B. S. Teo. 2007. Investigation into the influence of direct current (DC) power in the magnetron sputtering process on the copper crystallite size. **Microelectronics Journal**. 38: 60-62.
- Farhi, G., M. Aoucher and T. Mohammed-Brahim. 2002. Study of the solid phase crystallization behavior of amorphous sputtered silicon by X-ray diffraction and electrical measurements. **Solar Energy Materials & Solar Cells**. 72: 551–558.

- Fukaya, K., A. Tabata and T. Mizutani. 2005. Influence of target direct current bias voltage on the film structure of hydrogenated microcrystalline silicon prepared by direct current–radiofrequency coupled magnetron sputtering. **Thin Solid Films**. 478: 132– 136.
- Huang, G., Z. Xi and D. Yang. 2006. Crystallization of amorphous silicon thin films: The effect of rapid thermal processing pretreatment. **Vacuum**. 80: 415–420.
- Jang, K., K. Lee, J. Kim, S. Hwang, J. Lee, S. K. Dhungel, S. Jung and J. Yi. 2006. Effect of rapid thermal annealing of sputtered aluminium nitride film in an oxygen ambient. **Materials Science in Semiconductor Processing**. 9: 1137–1141.
- Jia, S., H. Ge, X. Geng and Z. Wang. 2000. Preparation of thin film polycrystalline silicon on glass by photo-thermal annealing. **Solar Energy Materials & Solar Cells**. 62: 201-205.
- Kondo, J., A. Tabata, T. Kawamura and T. Mizutani. 2002. Dependence on substrate temperature of the film structure of mc-Si:H prepared by RF magnetron sputtering. **Vacuum**. 66: 409–413.
- Konuma, M. 1992. **Film Deposition by Plasma Techniques**. Springer-Verlag, Berlin.
- Liang, S. L., K. W. Wang and Y. C. Liu. 1979. Argon Concentration of RF Sputtered Silicon Films. **Chinese Journal of Physics**. 17 (2): 102-106
- Makihara, H., A. Tabata, Y. Suzuoki and T. Mizutani. 2000. Effect of the hydrogen partial pressure ratio on the properties of uc-Si : H films prepared by rf magnetron sputtering. **Vacuum**. 59: 785-791.
- Masaki, Y., P. G. LeComber and A. G. Fitzgerald. 1993. Solid phase crystallization of thin film of Si prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition. **Journal of Applied Physics**. 74 (1): 129-134.

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

Plummer, J. D., M. D. Deal and P. B. Griffin. 2000. **Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling**. Prentice Hall, New Jersey.

Smith, D. L. 1995. **Thin-Film Deposition: Principle and Practice**. 1st ed. McGraw-Hill, Inc., New York.

Vaz, F., P. Cerqueira, L. Rebouta, S.M.C. Nascimento, E. Alves, Ph. Goudeau and J.P. Riviere.
2003. Preparation of magnetron sputtered TiN_xO_y thin films. **Surface and Coatings Technology**. 174 –175: 197–203.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบ

ความหนา th ของฟิล์มคำนวณได้โดยใช้สมการ (14)

$$th = \frac{m_2 - m_1}{ab \times \rho_{Si}} = \frac{\Delta m}{ab \times \rho_{Si}}$$

และอัตราการเคลือบ R คำนวณได้โดยใช้สมการ (15)

$$R = \frac{th}{t}$$

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณความหนาและอัตราการเคลือบของฟิล์มตัวอย่างที่ 1.15 ซึ่งจากตารางที่ 2 ได้ค่า $\Delta m/ab = 8.90 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$ และความหนาแน่นของซิลิกอน $\rho_{Si} = 2.33 \text{ g/cm}^3$ ดังนั้นจะได้ความหนาของฟิล์มดังนี้

$$th = \frac{\Delta m}{ab \times \rho_{Si}} = \frac{8.90 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2}{2.33 \text{ g/cm}^3} = 3.82 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยใช้เวลา 3 ชั่วโมง (180 นาที) จะได้อัตราการเคลือบดังนี้

$$R = \frac{th}{t} = \frac{3.82 \times 10^{-6} \text{ m}}{180 \text{ min}} = 21.23 \text{ nm/min}$$

ภาคผนวก ข

ตารางมาตรฐานจากรูปแบบการเลี้ยงเบนรังสีเอกซ์ของผลึกซิลิกอน

ตารางผนวกที่ ข1 ตารางมาตรฐานจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกซิลิกอน ที่มี
โครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า

2 θ	ความเข้ม (a.u.)	ระนาบ (hkl)	ระยะระหว่างระนาบ d _{hkl} (nm)
28.502	999	111	0.312918
47.405	551	220	0.191622
56.247	301	311	0.163416
58.989	1	222	0.156459
69.292	69	400	0.135498
76.561	96	331	0.124341
88.257	115	422	0.110633

ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ a เท่ากับ 0.54199 nm

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณระยะระหว่างระนาบ แลตทิซพารามิเตอร์
และขนาดเกรนของฟิล์ม

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณฟิล์มตัวอย่าง 1.0D20(07)10 ซึ่งจากตารางที่ 3 ได้ค่า $2\theta = 28.47^\circ$ และ $B = 6.977 \times 10^{-4}$ radian เมื่อ $n = 1$ และ $\lambda = 0.1541$ nm

จากสมการ (8) จะได้ระยะระหว่างระนาบ d_{111} ของฟิล์ม ดังนี้

$$d_{111} = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} = \frac{0.1541 \text{ nm}}{2 \sin(14.24^\circ)} = 0.3133 \text{ nm}$$

จากสมการ (9) สามารถหาแลตทิซพารามิเตอร์ a ได้ดังนี้

$$a = d\sqrt{h^2+k^2+l^2} = 0.3133 \times \sqrt{1^2+1^2+1^2} = 0.54272 \text{ nm}$$

จากสมการ (11) สามารถหาขนาดเกรน D_{111} ได้ดังนี้

$$D_{111} = \frac{0.89\lambda}{B\cos\theta} = \frac{0.89 \times 0.1541}{6.977 \times 10^{-4} \times \cos(14.24^\circ)} = 202.79 \text{ nm}$$