

การเตรียมฟิล์มบางโพลีบดึ้นที่มีความเค้นตัก้างต่ำโดยตีซีแมกนิตรอนสป้ตเตอริง



นาย เฉลิมวัฒน์ วงศ์วานิชวัฒนา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณทิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-179-853-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF LOW RESIDUAL STRESS MOLYBDENUM THIN FILMS
BY DC MAGNETRON SPUTTERING

Mr. Chalermwat Wongwanitwattana



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-179-853-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมฟิล์มบางโพลีบิโตนัมที่มีความเค้นตึงต่างต่ำโดย
	ดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง
โดย	นาย เฉลิมวัฒน์ วงศ์วานิชวัฒนา
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)	อาจารย์ ดร. สมชาย เกียรติกมลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิเคราะห์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันทิกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม (ถ้ามี)
(อาจารย์ ดร. สมชาย เกียรติกมลชัย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศจี วงศ์ไชยบุญธรรม)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง)

บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

เฉลิมวัฒน์ วงศ์วานิชวัฒนา : การเตรียมฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีความเค้นตกค้างต่ำโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง. (PREPARATION OF LOW RESIDUAL STRESS MOLYBDENUM THIN FILMS BY DC MAGNETRON SPUTTERING) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. สมชาย เกียรติกมลชัย 75หน้า. ISBN 974-179-853-9.

ฟิล์มบางโมลิบดีนัมบนกระจกโซดาไลม์ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นฟิล์มที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางของสารประกอบคอปเปอร์อินเดียม แกลเลียมไดเซลิไนด์ สมบัติที่เหมาะสมของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ใช้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์คือฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ความเค้นตกค้างภายในต่ำและสภาพการยึดติดสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สมบัติของฟิล์มดังกล่าวสามารถควบคุมได้จากความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสปัตเตอริง จากการทดลองเตรียมฟิล์มชนิดชั้นเดียวหนา 2,500 Å เมื่อสปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอนต่ำฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ มีความเค้นตกค้างสูงทำให้สภาพการยึดติดของฟิล์มกับกระจกไม่ดี แต่เมื่อสปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอนสูง ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง มีความเค้นตกค้างต่ำทำให้สภาพการยึดติดของฟิล์มกับกระจกสูง โดยสปัตเตอริงที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar เราพบว่าฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 2.12×10^{-5} Ω cm ฟิล์มมีความเค้นตกค้างสูงซึ่งทำให้ฟิล์มมีสภาพการยึดติดต่ำที่สุดเท่ากับ 1765 kPa ทดสอบโดยวิธี pull-off สำหรับฟิล์มที่สปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} mbar มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 11.06×10^{-5} Ω cm แต่ฟิล์มมีความเค้นตกค้างต่ำสุดซึ่งทำให้ฟิล์มมีสภาพการยึดติดมากกว่า 3447 kPa และไม่สามารถดึงฟิล์มให้หลุดจากกระจกได้ สำหรับฟิล์มชนิดสองชั้นเป็นการสปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} mbar เป็นชั้นแรกและสปัตเตอริงต่อด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar จนฟิล์มหนา 2,500 Å จากการทดลองเมื่อความหนาของฟิล์มชั้นแรกเพิ่มขึ้นฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นแต่ความเค้นตกค้างภายในลดลงทำให้ฟิล์มมีสภาพการยึดติดสูง โดยที่ฟิล์มชั้นแรก สปัตเตอริงนาน 20 วินาที ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 4.48×10^{-5} Ω cm ความเค้นตกค้างภายในต่ำและมีสภาพการยึดติดสูงเท่ากับ 2971 kPa จากสภาวะดังกล่าวฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเป็นฟิล์มชั้นเดียวที่เตรียมที่ความดันแก๊สอาร์กอน 5×10^{-3} mbar ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 2.53×10^{-5} Ω cm มีความเค้นตกค้างต่ำซึ่งทำให้สภาพการยึดติดสูงเท่ากับ 2337 kPa

ภาควิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....ฟิสิกส์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

AN ABSTRACT

4272245623 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: MOLYBDENUM FILM / MONOLAYER / BILAYER

CHALERMWAT WONGWANITWATTANA : PREPARATION OF LOW RESIDUAL STRESS MOLYBDENUM THIN FILMS BY DC MAGNETRON SPUTTERING. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. SOMPHONG CHATRAPORN, THESIS COADVISOR : SOMCHY KERDTIMONCHAI, Ph.D., 75 pp. ISBN 974-179-853-9.

Molybdenum (Mo) thin films deposited on soda-lime glass by dc magnetron sputtering are normally used as back contact for copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) thin film solar cells. The appropriate properties of Mo thin films to be used for the device are films with low resistivity, and highly adhere to the glass substrate. In addition, the films must be highly tolerate to the change of temperature. These properties can be managed by controlling the argon (Ar) pressure during the deposition process. For Mo films sputtered by using low Ar pressure, the resistivity is low, but the residual stress is high and poor in adhesion. In the contrary, for films sputtered by using high Ar pressure, the resistivity is high together with low residual stress and good adhesion. From this experiment, for monolayer films of 2,500 Å, sputtered at 4×10^{-3} mbar, the resistivity is in the range of $2.12 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$. The residual stress of films is high, resulting in the low adhesion which has the value of 1765 kPa as determined by the pull-off technique. For Mo films sputtered at 8×10^{-3} mbar, the resistivity is in the range of $11.06 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$. These films are low in residual stress and highly adhere to the soda-lime glass. Thus, in order to compensate the resistivity and adhesion, bilayer films are developed. Mo bilayer films which are deposited at 8×10^{-3} mbar follow by 4×10^{-3} mbar with the total thickness of 2,500 Å has high adhesion of 2971 kPa together with moderate resistivity of $4.48 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$. In conclusion, the appropriate Mo films to be used as the back contact for CIGS thin film solar cells are monolayer films sputtered at Ar pressure of 5×10^{-3} mbar. The average resistivity of these films are $2.53 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$, together with low residual stress and moderate adhesion of 2337 kPa.

Department.....Physics..... Student's signature.....

Field of study.....Physics..... Advisor's signature.....

Academic year2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ , ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขวรงค์ อยู่ดี , อาจารย์ ดร.สมชาย เกียรติกมลชัย และอาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ที่ได้ให้คำแนะนำติดตามและควบคุมงานวิจัยอย่างใกล้ชิด ตลอดจนตรวจตราแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ พงษ์ ทรงพงษ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหอย่างใกล้ชิด

ขอขอบคุณ นางจิระประภา เนียมปาน พนักงานวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยาที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการใช้เครื่อง x-ray diffraction

ขอขอบคุณ คุณวรรณบ แดงงาม เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ ซึ่งให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่คุณวรรณบปฏิบัติหน้าที่อยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ขอบใจเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีทุกเรื่องตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ใช้ความช่วยเหลือทุกอย่างทุกด้าน ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ดิซีโกลวดิสซาร์จ	4
2.1 การเกิดดิซีโกลวดิสซาร์จ	4
2.2 การกระจายความต่างศักย์ สนามไฟฟ้า และกระแสในโกลวดิสซาร์จ	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพโกลวดิสซาร์จ	12
2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ผิวคาโทด	14
2.5 สภาพโกลวดิสซาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก	15
บทที่ 3 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง	18
3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปัตเตอริง	18
3.2 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดิซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง	20
บทที่ 4 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	22
4.1 ความเค้นตกค้าง	22
4.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า	26
4.3 สภาพการยึดติด	28
บทที่ 5 วิธีดำเนินการทดลองและผลการทดลอง	29
5.1 การเตรียมวัสดุรองรับ	30
5.2 การเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัม	30
5.3 ลักษณะฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอริง	31
5.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดชั้นเดียว	32
5.5 การอบฟิล์มชนิดชั้นเดียว	36
5.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของฟิล์มชนิดชั้นเดียว	37
5.6.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า	37
5.6.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้าง	40

สารบัญ (ต่อ)

	ช หน้า
5.6.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการยึดติด	49
5.7 फिल्मชนิดสองชั้น	51
5.8 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดสองชั้น	52
5.9 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของฟิล์มชนิดสองชั้น	54
5.9.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า	54
5.9.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้าง	56
5.9.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการยึดติด	67
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	72
ประวัติผู้เขียน	75



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 5.1	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของฟิล์มที่สเปคเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ	35
ตารางที่ 5.2	ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของฟิล์ม($\times 10^{-5} \Omega\text{cm}$) ที่ความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ	38
ตารางที่ 5.3	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar	40
ตารางที่ 5.4	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 5×10^{-3} mbar	41
ตารางที่ 5.5	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 6×10^{-3} mbar	42
ตารางที่ 5.6	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 7×10^{-3} mbar	43
ตารางที่ 5.7	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8×10^{-3} mbar	44
ตารางที่ 5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มกับความดันแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่างๆ	50
ตารางที่ 5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์มชั้นแรกตามเวลาที่ใช้ในการสเปคเตอร์	52
ตารางที่ 5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการสเปคเตอร์	54
ตารางที่ 5.11	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสเปคเตอร์นาน 20 วินาที	56
ตารางที่ 5.12	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสเปคเตอร์นาน 30 วินาที	57
ตารางที่ 5.13	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสเปคเตอร์นาน 40 วินาที	58
ตารางที่ 5.14	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสเปคเตอร์นาน 50 วินาที	59

สารบัญ (ต่อ)

ญ

หน้า

ตารางที่ 5.15	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโพลีบดัดนํมชนิดสองชั้น ที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 60 วินาที	60
ตารางที่ 5.16	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโพลีบดัดนํมชนิดสองชั้น ที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 120 วินาที	61
ตารางที่ 5.17	ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโพลีบดัดนํมชนิดสองชั้น ที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 180 วินาที	62
ตารางที่ 5.18	แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มชนิดสองชั้นให้หลุดออกจากกระจกโซดาไลม์	68



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS	2
รูปที่ 2.1 ระบบดิสชาร์จโกลด์ดิซชาร์จอย่างง่าย	4
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของ ดิสชาร์จโกลด์ดิซชาร์จในระบบที่ใช้แก๊สไนออน 1 Torr	6
รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเซนแสดงความต่างศักย์ฟังก์ชันของแก๊สระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว อยู่ห่างกันเป็นระยะ d (cm) ที่ความดัน P (torr) คำนวณจากสมการที่ (2.2) เส้นที่ 1 ได้จากค่า $A = 2500 \text{ Volt}/(\text{torr}\cdot\text{cm})$ $C = 2.18$ เส้นที่ 2 ได้จาก $A = 2250 \text{ Volt}/(\text{torr}\cdot\text{cm})$ $C = 1.98$ และเส้นที่ 3 ได้ จาก $A = 2000$ $\text{Volt}/(\text{torr}\cdot\text{cm})$ $C = 1.78$	7
รูปที่ 2.4 ชั้นของ positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential(V_f) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา(รูปล่าง)	9
รูปที่ 2.5 ลักษณะของดิสชาร์จโกลด์ดิซชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดิซชาร์จได้เอง (ความเข้มของการแรงแสดงถึงความเข้มของการไหล)	10
รูปที่ 2.6 แสดงศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดิสชาร์จโกลด์ดิซชาร์จรวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่วางให้สัมผัสกับการดิซชาร์จ	10
รูปที่ 2.7 ลักษณะสนามไฟฟ้าในดิสชาร์จโกลด์ดิซชาร์จ	11
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของสนามไฟฟ้า(\vec{E}) และสนามแม่เหล็ก(\vec{B})ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ก. อิเล็กตรอนถูกเร่งตรงไปยังคาโนดเมื่อ \vec{B} ขนานกับ \vec{E} และ $\theta = 0$ ข. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch เพิ่มขึ้นเมื่อ \vec{B} ขนานกับ \vec{E} และ $\theta \neq 0$ ค. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะ pitch คงที่เมื่อ $\vec{B} \neq 0$, \vec{E} และ $\theta \neq 0$	16
รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวคาโนดด้วยความเร็ว \vec{v} เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ซึ่งมีทิศขนานกับผิวของคาโนด (พุ่งเข้าหาหน้ากระดาษ)และสมมติว่าไม่มีกระแสไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งหลุดจากผิวคาโนดด้วยความเร็ว \vec{v} เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ซึ่งมีความเข้มคงที่และขนานกับผิวของ คาโนด(พุ่งเข้าหาหน้ากระดาษ)และสนามไฟฟ้าซึ่งลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะ ทางจากคาโนดและมีทิศพุ่งเข้าสู่คาโนด	17

สารบัญ (ต่อ)

ฎ
หน้า

รูปที่ 3.1	กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวเป้า	18
รูปที่ 3.2	การสปีดเตอร์เปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด	19
รูปที่ 3.3	การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปีดเตอร์จริง	20
รูปที่ 3.4	ระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์จริง	21
รูปที่ 4.1	แสดงฟิล์มบาง silver lithium ภายใต้ความเค้นดึง	
	ก. แบบจำลองของฟิล์มภายใต้ความเค้นดึง	
	ข. ลักษณะของฟิล์มลอกเนื่องจากความเค้นดึง	22
รูปที่ 4.2	แสดงฟิล์มบาง silver lithium ภายใต้ความเค้นอัด	
	ก. แบบจำลองของฟิล์มภายใต้ความเค้นดึง	
	ข. ลักษณะของฟิล์มลอกเนื่องจากความเค้นอัด	23
รูปที่ 4.3	แท่งทรงกระบอกถูกแรง F กระทำในแนวแกน y	24
รูปที่ 4.4	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชุดระนาบ hkl ในโครงสร้างฟิล์มภายใต้ความเค้น	25
รูปที่ 4.5	แสดงข้อสัมผัสตั้งสี่ขั้วบนตัวอย่างรูปทรงใดๆ	26
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และ Q	27
รูปที่ 4.7	แสดงการทดสอบสภาพการยึดติด	28
รูปที่ 5.1	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	29
รูปที่ 5.2	ลักษณะของฟิล์มที่ลอกออกจากกระจก ผิวฟิล์มแตก ขรุขระ	31
รูปที่ 5.3	ลักษณะของฟิล์มที่มีสภาพการยึดติดดี ผิวเรียบ เป็นเงาสะท้อนแสง	31
รูปที่ 5.4	การแบ่งฟิล์มเพื่อทำการวัดค่าสภาพต้านทานและโคออร์ดิเนต	32
รูปที่ 5.5	การกระจายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนกระจกในหน่วย $\times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ ของ M1P41 ที่ฟิล์มสปีดเตอร์จริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar	33
รูปที่ 5.6	การกระจายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบพื้นผิวของ M1P41 ที่ฟิล์มสปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar	33
รูปที่ 5.7	ผลการวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มที่ได้จากการสปีดเตอร์ซ้ำในแต่ละครั้ง	
	■ สปีดเตอร์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 8×10^{-3} mbar	
	◆ สปีดเตอร์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar	34
รูปที่ 5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยกับความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้สปีดเตอร์	35

สารบัญ (ต่อ)

ฐ

		หน้า
รูปที่ 5.9	ลักษณะของฟิล์มที่แบ่งได้เพื่อการอบ	37
รูปที่ 5.10	ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ	39
รูปที่ 5.11	การเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ และเส้นตรงแสดงตำแหน่ง $2\theta = 40.516$ องศา	45
รูปที่ 5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 1	46
รูปที่ 5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 2	47
รูปที่ 5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 3	48
รูปที่ 5.15	ขั้นตอนงานวิจัยฟิล์มชนิดสองชั้น	51
รูปที่ 5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการสเป็คเตอรืฟิล์มชั้นแรก	53
รูปที่ 5.17	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดสองชั้น	55
รูปที่ 5.18	การเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ และเส้นตรงแสดงตำแหน่ง $2\theta = 40.516$ องศา ของฟิล์มชนิดสองชั้น	63
รูปที่ 5.19	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้นของการทดลองชุดที่ 1	64
รูปที่ 5.20	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้นของการทดลองชุดที่ 2	65
รูปที่ 5.21	ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้นของการทดลองชุดที่ 3	66
รูปที่ ผ-1	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอรืด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มไม่ผ่านการอบ	72
รูปที่ ผ-2	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอรืด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200°C	72
รูปที่ ผ-3	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอรืด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300°C	73
รูปที่ ผ-4	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอรืด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 400°C	73

สารบัญ (ต่อ)

๓

หน้า

รูปที่ ผ-5	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเปคเตอร์ด้วยความดัน แก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
รูปที่ ผ-6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเปคเตอร์ด้วยความดัน แก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	74



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

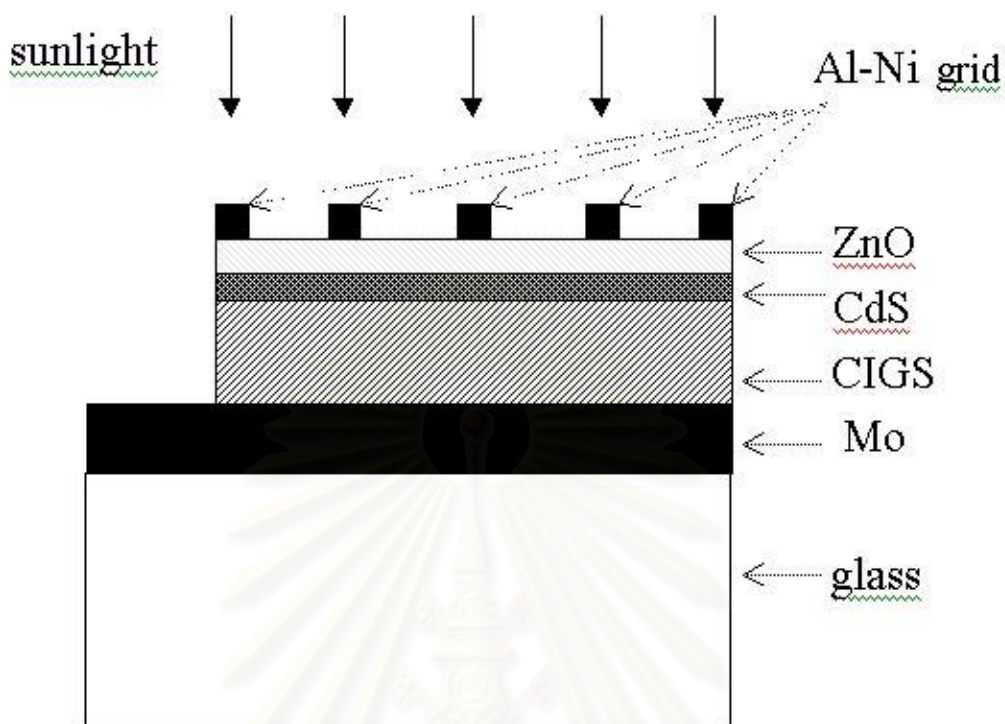
บทที่ 1

บทนำ

การสับตัดเออร์ริงเป็นเทคนิคที่ใช้เคลือบฟิล์มบางอย่างกว้างขวางโดยเคลือบฟิล์มภายในโกลด์ดิสชาร์จ การสับตัดเออร์ริงสามารถเคลือบฟิล์มบางได้หลายชนิดลงบนวัสดุรองรับ เช่น ฟิล์มบางของโลหะ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ หรือฟิล์มบางของฉนวน ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอสูงอีกทั้งยังสามารถเคลือบฟิล์มบางลงบนพื้นที่ขนาดใหญ่โดยยังคงความสม่ำเสมอไว้สูงได้เพื่อขยายผลทางงานวิจัยสู่ตลาด[1]

การประยุกต์ใช้งานที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการสร้างฟิล์มบางที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางของสารประกอบคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซีลีไนต์ (CIGS) โดยใช้ในการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ชนิดเอ็น (n-ZnO) และฟิล์มบางโมลิบดีนัม ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ประกอบด้วยฟิล์มบางหลายชนิดซ้อนทับกันดังนี้ อะลูมิเนียมเกิดการกัดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน / ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ชนิดเอ็นทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง / ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ชนิดเอ็นทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นกระแส / ฟิล์มบางของ CIGS ทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง / ฟิล์มบางโมลิบดีนัมทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง และกระจกโซดาไลม์ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับ[2] ตามรูปที่ 1.1

การใช้ฟิล์มบางโมลิบดีนัมเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ทั้งนี้เพราะผลงานวิจัยเพื่อศึกษาหาฟิล์มที่มีสมบัติที่เหมาะสมพบว่าฟิล์มบางโมลิบดีนัมมีสภาพต้านทานไฟฟ้าบริเวณรอยต่อกับฟิล์มบาง CIGS น้อยกว่าฟิล์มของโลหะชนิดอื่นยกเว้น เงิน ทอง และทองคำขาว แต่โลหะดังกล่าวมีต้นทุนสูงจึงทำให้โมลิบดีนัมเป็นทางเลือกที่ดีกว่า อีกทั้งฟิล์มบางโมลิบดีนัมมีความทนต่อความร้อนสูงถึง 600 องศาเซลเซียสจึงสามารถต่อต้านการแพร่เข้าร่วมตัวกับทองแดงและอินเดียมกลายเป็นสารอัลลอยด์ที่ทำให้สมบัติของฟิล์มบาง CIGS เสียไป[3,4,5] โดยงานวิจัยนี้สนใจศึกษาเฉพาะฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์อาทิตย์แบบ CIGS ฟิล์มบางโมลิบดีนัมถูกสับตัดเออร์ริงบนกระจกโซดาไลม์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ โดยมีจุดมุ่งหมายที่ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความเค้นตึงภายในต่ำและมีสภาพการยึดติดสูงเพื่อป้องกันการลอกหลุดของฟิล์ม[6,7] ทั้งนี้เพราะในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS ต้องผ่านหลายขั้นตอนฟิล์มจะต้องผ่านการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนหลายขั้นตอน ดังนั้นฟิล์มต้องมีสภาพการยึดติดสูง และยังคงคำนึงถึงสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเพื่อไม่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS ดังนี้

1. ฟิล์มบางของโมลิบดีนัมที่มีความเค้นตึงภายในฟิล์มต่ำ
2. ฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีการยึดติดบนกระจกได้ดีตลอดช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิอ่อนตัวของกระจก
3. ฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ

สมบัติของฟิล์มบางที่ได้จากการสับเตอริงสามารถควบคุมได้จากเงื่อนไขการสับเตอริงเช่น กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบสับเตอริง อุณหภูมิของวัสดุรองรับ และ

ความดันแก๊สอาร์กอนเพียงตัวแปรเดียวทั้งนี้เพราะการจัดเรียงตัวของฟิล์มขึ้นกับความดันแก๊สอาร์กอน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

สามารถเตรียมฟิล์มบางโพลีบิตินัมที่มีความเค้นตกค้างต่ำ มีสภาพการยึดติดสูง และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ เหมาะสมต่อการทำเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบCIGS

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาการเคลือบฟิล์มโดยวิธีการสปีดเทอริงและการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า ความเค้นตกค้าง และสภาพการยึดติด
2. เตรียมฟิล์มบางโพลีบิตินัมชนิดชั้นเดียวและแอนนีกฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ
3. วัดสมบัติของฟิล์มชนิดชั้นเดียว
4. วิเคราะห์ผลการทดลองของฟิล์มชนิดชั้นเดียว
5. เตรียมฟิล์มบางโพลีบิตินัมชนิดสองชั้นและแอนนีกฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ
6. วัดสมบัติของฟิล์มชนิดสองชั้น
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ลำดับและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 6 บท บทแรกเป็นบทนำ ในบทที่สองและสามเป็นทฤษฎีและเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการสปีดเทอริง และบทที่สี่กล่าวถึงทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม บทที่ห้าเป็นขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง บทสุดท้ายคือบทที่หกเป็นบทสรุป

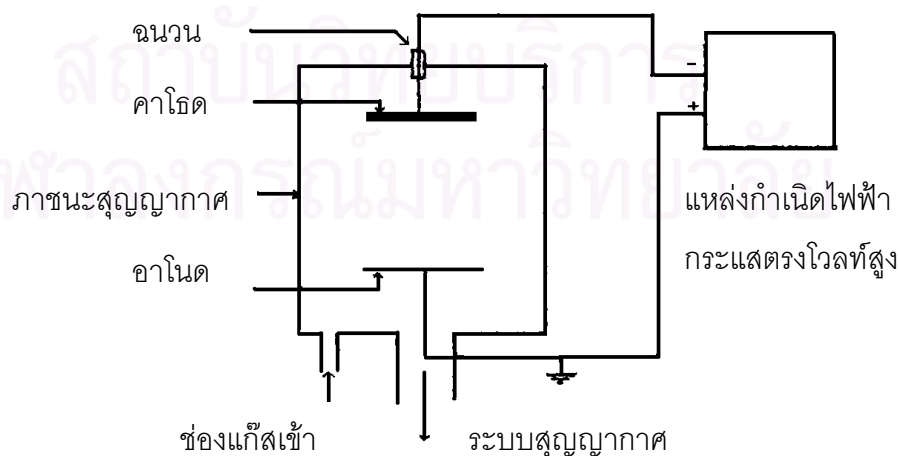
บทที่ 2 ดิสชาร์จพลาสมา

พลาสมา คือ สภาวะที่อะตอมหรือโมเลกุลอยู่ในสภาวะที่ถูกไอออไนซ์ตลอดเวลา โดยมีอิเล็กตรอนเป็นตัวรับพลังงานจากระบบภายนอกที่เป็นตัวกระตุ้นทำให้ขบวนการไอออไนซ์ในระบบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สภาวะเช่นนี้เหมือนพลาสมาอุดมคติโดยมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าแบบกึ่งเสถียร(quasi neutrality)

พลาสมาสามารถเกิดได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าความต่างสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วภายในภาชนะบรรจุแก๊สความดันต่ำ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้เป็นกระแสตรงเรียกว่า"ดิสชาร์จพลาสมา (dc glow discharge)" แต่ถ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเรียกว่า"อาร์เอฟพลาสมา (rf glow discharge)" โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (radio frequency : RF) 13.56 เมกะเฮิรตซ์ตามข้อตกลงขององค์การสื่อสารระหว่างประเทศ ความรู้ด้านพลาสมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมพื้นผิวและเทคโนโลยีฟิล์มบางได้แก่ sputtering deposition, plasma etching, plasma enhanced chemical vapor deposition[8,9,10]

2.1 การเกิดดิสชาร์จพลาสมา

ระบบดิสชาร์จพลาสมาอย่างง่ายแสดงตามรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยขั้วคาโทด (cathode) และแอโนด(anode) วางขนานอยู่ในภาชนะสุญญากาศ(vacuum chamber) ที่บรรจุแก๊สความดันต่ำ เช่น อาร์กอน นีออน ซีนอน คริปทอน หรือแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจน เป็นต้น[9,10]



รูปที่ 2.1 ระบบดิสชาร์จพลาสมาอย่างง่าย[11]

เมื่อป้อนความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโวลต์สูงเข้าที่ขั้วไฟฟ้าอาโนดและคาโทดจะได้สนามไฟฟ้าขนาด V/d ซึ่ง V คือความต่างศักย์ และ d คือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยที่มีในวงจรเป็นกระแสของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ(primary electron) ที่หลุดจากขั้วคาโทดที่เนื่องจากการกระตุ้นของรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น รังสีคอสมิก, รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น จากนั้นจะถูกเร่งไปยังขั้วอาโนดเนื่องจากสนามไฟฟ้าโดยสภาวะความต่างศักย์และความดันที่เหมาะสม อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสะสมพลังงานได้มากพอที่จะไอออไนซ์อะตอมของแก๊สในภาชนะสุญญากาศให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนได้ ความต่างศักย์ที่เหมาะสมคือ ค่าความต่างศักย์ที่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจลน์อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระดับพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมแก๊ส และระดับความดันที่เหมาะสมถ้าความดันต่ำมากจนทำให้ระยะอิสระเฉลี่ย(mean free path) ของอิเล็กตรอนมากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและอาโนด[12] อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังอาโนดโดยไม่เกิดการชนอะตอมแก๊สทำให้ไม่เกิดการไอออไนซ์ขึ้น แต่ถ้าความดันสูงเกินไประยะอิสระเฉลี่ยสั้นมากอิเล็กตรอนไม่สามารถสะสมพลังงานได้มากพอที่จะไอออไนซ์อะตอมแก๊สทำให้ไม่เกิดการไอออไนซ์เช่นเดียวกัน

เมื่ออะตอมของแก๊สถูกชนด้วยอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron) ไอออนบวกจะถูกเร่งไปยังขั้วคาโทดและทั้งอิเล็กตรอนปฐมภูมิและอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกเร่งไปยังขั้วอาโนด ระหว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอาโนด จะเกิดการสะสมพลังงานและไอออไนซ์อะตอมแก๊สอย่างต่อเนื่อง ส่วนไอออนบวกจะถูกเร่งไปคาโทดด้วยพลังงานจลน์ที่สูงพอที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากการชนที่ผิวคาโทดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งไปยังอาโนดทำให้เกิดการไอออไนซ์มากขึ้นประจุไฟฟ้าในระบบจะเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่ความต่างศักย์คงที่เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะการพังทลาย(breakdown) และเรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์พังทลาย (breakdown voltage : V_B)

กระบวนการที่เกิดขึ้นจนถึงจุดพังทลายเรียกว่า townsend discharge ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกระแสในระบบเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 \exp(\alpha d) [1 + \gamma \exp(\alpha d) + \gamma^2 \exp(\alpha d)^2 + \dots] = I_0 \frac{\exp(\alpha d)}{[1 - \gamma \exp(\alpha d)]} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_0 เป็นกระแสอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากการกระตุ้นจากภายนอก

α เป็นจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของอิเล็กตรอน

γ เป็นสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ผิวคาโทดจากการชนของไอออนบวก

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.1 เราสามารถทำนายการพังทลายที่ $1 - \gamma \exp(\alpha d) = 0$ ความต่างศักย์พังทลายในหน่วยโวลต์จะสัมพันธ์กับความดันแก๊สและระยะทางระหว่างคาโทดและอานอดตามสมการ[9]

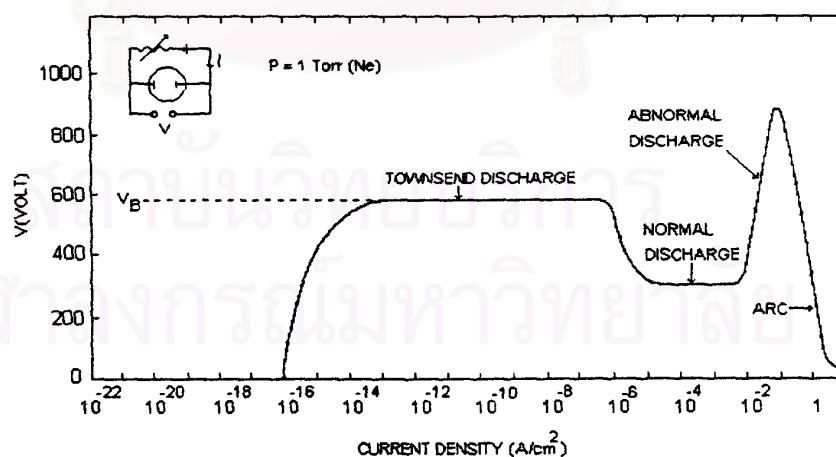
$$V_B = \frac{A(Pd)}{C + \ln(Pd)} \quad (2.2)$$

เมื่อ A และ C เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแก๊ส

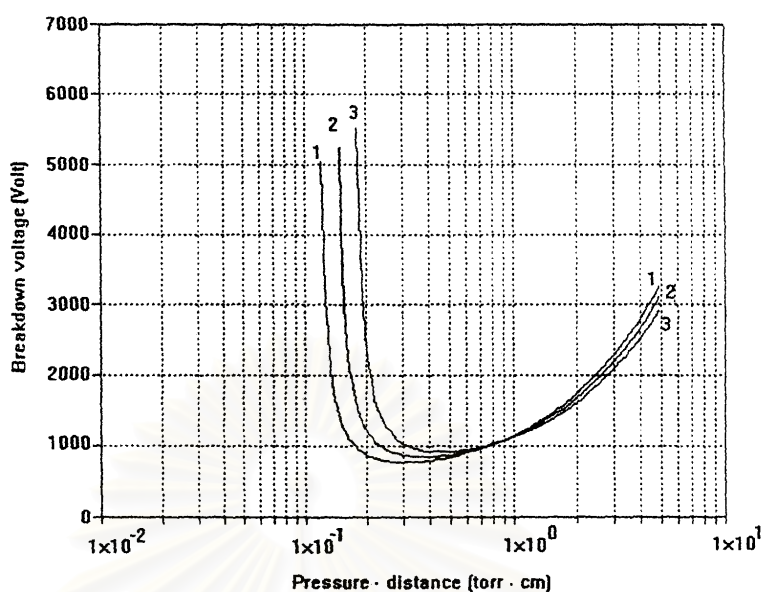
P เป็นความดันแก๊สในหน่วยทอรร

d เป็นระยะห่างระหว่างคาโทดและอานอด

สมการ 2.2 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.3 เส้นโค้งนี้เรียกว่า เส้นโค้งพาสเชน(paschen curve) เส้นโค้งจะให้ค่าพังทลายต่ำสุดเรียกว่า จุดต่ำสุดพาสเชน จากกราฟเมื่อ d คงที่ การลดหรือเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความต่างศักย์พังทลายสูงขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะชนอะตอมแก๊สน้อยลงเมื่อความดันแก๊สน้อยลง และจะใช้ความต่างศักย์สูงเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงเมื่อความดันแก๊สสูงขึ้น แก๊สแต่ละชนิดจะให้เส้นโค้งพาสเชนที่แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของระดับพลังงานไอออไนซ์และค่าภาคตัดขวางของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ของ ดีซีโกลวดิสชาร์จในระบบที่ใช้แก๊สเนออนความดัน 1 Torr [13]



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งพาสเซนแสดงความต่างศักย์พังทลายของแก๊สระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วอยู่ห่างกันเป็นระยะ d (cm) ที่ความดัน P (torr) คำนวณจากสมการที่(2.2) เส้นที่ 1 ได้จากค่า $A = 2500$ Volt/(torr·cm) $C = 2.18$ เส้นที่ 2 ได้จาก $A = 2250$ Volt/(torr·cm) $C = 1.98$ และเส้นที่ 3 ได้ จาก $A = 2000$ Volt/(torr·cm) $C = 1.78$ [13]

จากรูปที่ 2.2 เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นถึงจุดพังทลายแล้วยังมีกำลังไฟฟ้าป้อนให้กับระบบอย่างเพียงพอ กระบวนการเพิ่มของกระแสจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดที่ไอออนบวกกับอิเล็กตรอนสามารถควบคุมกันเองได้ โดยที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากผิวคาโทดสามารถทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มมากพอที่จะผลิตจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิจำนวนเท่าเดิม ระบบจะรักษาสภาพโกลดดิสชาร์จ์ได้เอง(self-sustained) โดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิอีกต่อไปแล้วในสถานะโกลดดิสชาร์จ์ ซึ่งจะเริ่มเห็นแสงในบริเวณโกลดดิสชาร์จ์อย่างชัดเจนขณะเดียวกันความต่างศักย์จะลดลงเรียกว่าสภาวะนี้ว่า normal discharge เป็นช่วงที่มีการโกลดหนาแน่นบริเวณเหนือขอบและผิวขรุขระของคาโทด การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายจะไม่มีผลต่อความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่จะเพิ่มกระแสเพียงอย่างเดียว เมื่อความหนาแน่นกระแสทั่วทั้งผิวคาโทดจะเริ่มมีการโกลดบริเวณผิวคาโทดอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นขบวนการโกลด จะเริ่มเข้าสู่ย่าน abnormal discharge ช่วงนี้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะทำให้กระแสและความต่างศักย์เพิ่มขึ้น หากมีการป้อนกำลังไฟฟ้าต่อไปอีกจนกระทั่งถึงจุดที่คาโทดปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน(thermionic electron)นอกเหนือจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ การเพิ่มของกระแสขณะนี้จะเพิ่มสูงขึ้นแต่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นช่วงที่เกิดการอาร์ก(arc)

การใช้งานสภาพโกลวดิซาร์จปกติอยู่ในช่วง abnormal discharge เช่นในการสเป็คเตอริง(sputtering) ซึ่งช่วงนี้ความหนาแน่นกระแสของการดิซาร์จมีค่าสูงและสามารถควบคุมได้จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าโดยตรง

2.2 การกระจายความต่างศักย์ สนามไฟฟ้า และกระแสในสภาพโกลวดิซาร์จ

เมื่อพิจารณาสภาพโกลวดิซาร์จจะเห็นว่าสภาพเป็นพลาสมาอุดมคติซึ่งประกอบด้วยอนุภาคสามชนิดคือ ไอออนบวก อิเล็กตรอน และอะตอมแก๊สที่เป็นกลาง การกระจายของอนุภาคเหล่านี้ถือว่าสม่ำเสมอจึงเป็นบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า(field-free region)

เมื่อพื้นผิวที่ไม่เชื่อมต่อกับไฟฟ้า(electric floating)สัมผัสกับพลาสมา พื้นผิวจะถูกชนด้วยอนุภาคที่มีอยู่ในพลาสมา พลั๊กซ์ของแต่ละอนุภาคจะตกกระทบในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว(สมมติทิศ x) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ดังนั้นพลั๊กซ์ของอนุภาคเขียนได้ดังสมการ 2.3[14]

$$\Phi = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (2.3)$$

โดยที่ความเร็วเฉลี่ยของแก๊สอุดมคติ

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.4)$$

และ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานจลน์ E_k

$$E_k = \frac{3}{2} k_B T \quad (2.5)$$

การชนที่ผิวของอิเล็กตรอนและไอออนบวกจะทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสยังผล(effective current density) อันเนื่องมาจากอนุภาคเหล่านี้มีประจุ มีความสัมพันธ์ดังสมการ

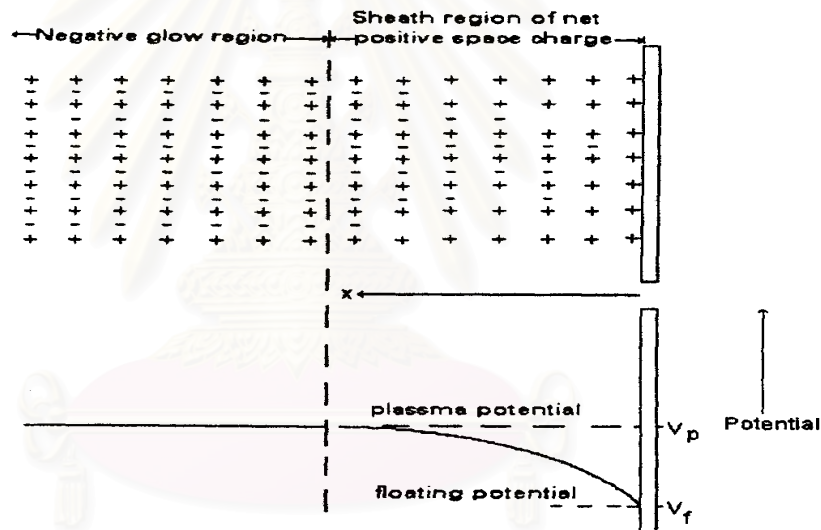
$$J = q\Phi = \frac{nq\bar{v}}{4} \quad (2.6)$$

เมื่อ J เป็นความหนาแน่นกระแสยังผลที่มีประจุ q

n เป็นความหนาแน่นอนุภาค

\bar{v} เป็นความเร็วเฉลี่ยของอนุภาค

ในระบบที่บรรจุแก๊สอาร์กอนความดัน 10 มิลลิทอร์รี่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีอิเล็กตรอนและไอออนบวกประมาณ 10^{10} อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมการ 2.6 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ตกกระทบพื้นผิวมีค่ามากกว่าไอออนบวก ดังนั้นพื้นผิวจึงถูกชาร์จโดยอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วทำให้พื้นผิวมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา เมื่อพื้นผิวถูกชาร์จโดยอิเล็กตรอนมากพอจะทำให้พื้นผิวเป็นลบและผลักอิเล็กตรอนด้วยกัน ทำให้ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนเท่ากับฟลักซ์ของไอออนบวกและได้ความหนาแน่นกระแสสุทธิเป็นศูนย์ เรียกศักย์ไฟฟ้าที่ผิวว่า floating potential (V_f) ผลของ floating potential ที่เป็นลบจะผลักอิเล็กตรอนทำให้บริเวณใกล้ๆ พื้นผิวมีประจุบวกอยู่เกิดเป็นชั้นของ positive space charge เรียกบริเวณนี้ว่า sheath region แสดงดังรูปที่ 2.4 การที่มีประจุบวกในบริเวณ sheath region ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งไม่เท่ากับศูนย์และมีค่าขึ้นกับตำแหน่ง(x)ที่ห่างจากผิว



รูปที่ 2.4 ชั้นของ positive space charge ใน sheath region (รูปบน) และ floating potential (V_f) บริเวณผิวหน้าของพื้นผิวที่สัมผัสกับพลาสมา(รูปล่าง) [10]

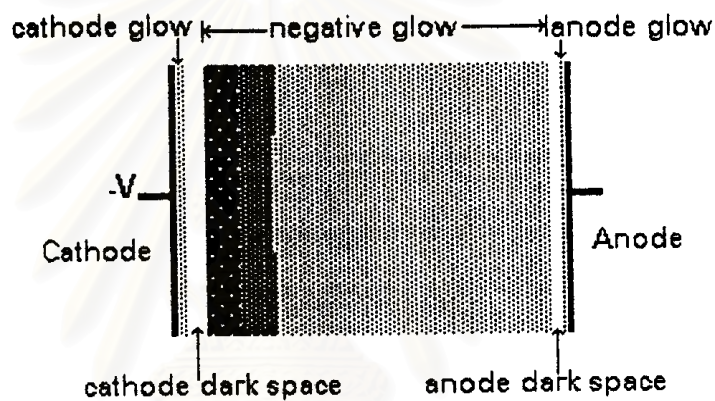
เนื่องจากบริเวณ sheath region เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำ ขบวนการไอออไนซ์ของแก๊สจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้มีความเข้มแสงบริเวณนี้ต่ำเรียกว่า บริเวณมืด(dark space) ซึ่งความต่างศักย์ตกคร่อม sheath region จะเขียนได้ดังสมการ[10]

$$V_p - V_f = \frac{k_B T_e}{2e} \ln \left(\frac{m_i T_e}{m_e T_i} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ T_e และ T_i เป็นอุณหภูมิของอิเล็กตรอนและไอออนบวก ตามลำดับ

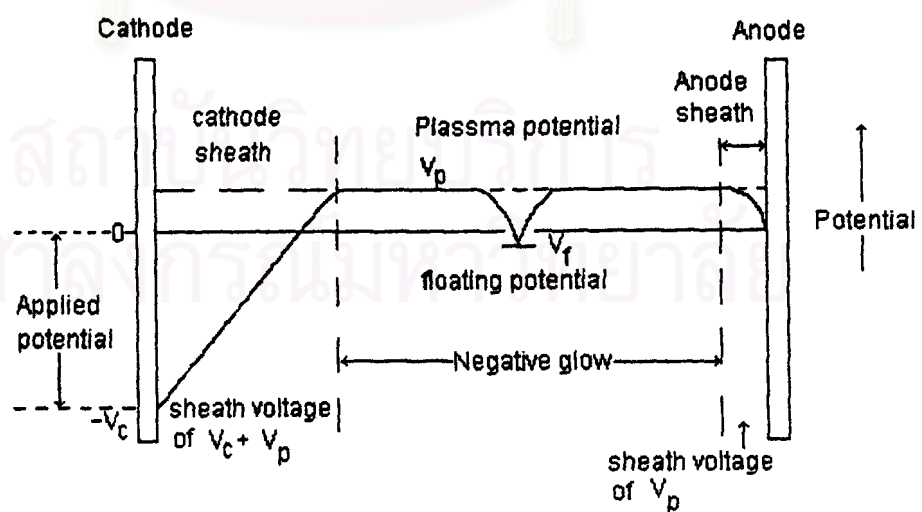
m_e และ m_i เป็นมวลของอิเล็กตรอนและไอออนบวก ตามลำดับ

สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบดีซีโกลวดิสชาร์จอย่างง่ายสามารถอธิบายด้วยความรู้เรื่อง sheath region จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ามืองค์ประกอบสามส่วนใหญ่ๆในระบบคือ cathode dark space , negative glow และ anode dark space นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่มีการเรืองแสงบางๆ บริเวณที่ผิวคาโทดและอานอดเกิดจากการที่ไอออนบวกถูกทำให้เป็นกลาง(neutralized) โดยกระบวนการรวมตัว(recombination)กับอิเล็กตรอนซึ่งจะช่วยลดการสะสมตัวของไอออนบวก บริเวณผิวของขั้วทั้งสอง สนามไฟฟ้าในดีซีโกลวดิสชาร์จจะมีความเข้มสูงในบริเวณมีดด้านหน้าคาโทด ส่วนในบริเวณ negative glow สนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์เนื่องจากเป็นพลาสมา บริเวณ cathode dark space เป็นบริเวณที่มีความต่างศักย์ที่ป้อนให้ระบบมาตกคร่อมทั้งหมดและเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเข้มสูงดังรูปที่ 2.6 และ 2.7



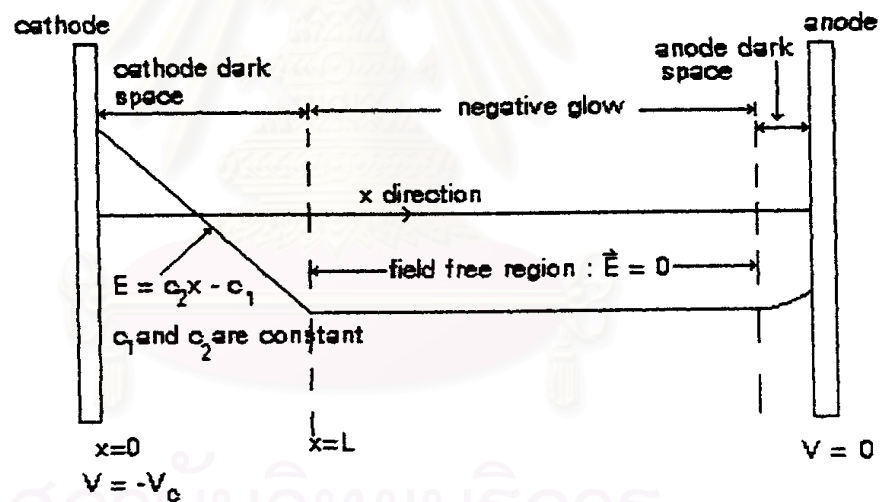
รูปที่ 2.5 ลักษณะของดีซีโกลวดิสชาร์จขณะที่สามารถรักษาสภาพการดีสชาร์จได้เอง

(ความเข้มของการเรืองแสงแสดงถึงความเข้มของการไหล) [10]



รูปที่ 2.6 แสดงศักย์ไฟฟ้าในส่วนต่างๆของดีซีโกลวดิสชาร์จรวมทั้งระดับของ floating potential บนผิวที่ไม่เชื่อมต่อกับไฟฟ้าที่วางให้สัมผัสกับการดีสชาร์จ [8]

สนามไฟฟ้าใน cathode dark space เป็นตัวเร่งไอออนบวกในบริเวณ negative glow ให้เคลื่อนที่เข้าชนคาโทด ขณะเดียวกันก็เป็นตัวเร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากคาโทดเข้าสู่บริเวณ negative glow การเร่งอนุภาคทั้งสองเป็นกลไกสำคัญในการรักษาสภาพโกลด์ดิสชาร์จด้วยตัวเองของระบบ ขนาดความต่างศักย์ที่ตกคร่อม cathode dark space จะมีผลต่อพลังงานจลน์ของไอออนบวกที่เข้าชนคาโทดและพลังงานของอิเล็กตรอนที่เข้าสู่บริเวณ negative glow เนื่องจากไอออนบวกในบริเวณ negative glow มีพลังงานจลน์ใกล้เคียงกับพลังงานจลน์เฉลี่ยของอะตอมแก๊สที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้าไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นขณะเคลื่อนที่ใน cathode dark space ไอออนบวกจะชนคาโทดด้วยพลังงานจลน์ เท่ากับพลังงานที่ได้จากศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม cathode dark space ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิขณะที่หลุดจากคาโทดถือว่ามีความพลังงานจลน์น้อยมาก ถ้าอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space โดยไม่มีการชนกับอนุภาคอื่นใดจะเข้าสู่บริเวณ negative glow ด้วยพลังงานจลน์ที่ได้จากการเร่งด้วยความต่างศักย์ที่ตกคร่อม cathode dark space อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เป็นตัวรับพลังงานจากภายนอกเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2.7 ลักษณะสนามไฟฟ้าในดีซีโกลด์ดิสชาร์จ[15]

จากรูปที่ 2.7 อิเล็กตรอนและไอออนบวกเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space โดยตรง เมื่อให้คาโทดมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $-V_c$ และสนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระยะทาง cathode dark space โดยที่คาโทดอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ ความยาวของ cathode dark space เท่ากับ L จะได้สมการความหนาแน่นกระแสการชาร์จ J ดังนี้[15]

$$J = \beta(V - V_0)^{\frac{3}{2}} \quad (2.8)$$

เมื่อ V เป็นความต่างศักย์ที่ป้อนจากภายนอก

V_0 เป็นความต่างศักย์น้อยที่สุดที่ยังเกิดการดีสชาร์จ

และ

$$\beta = (1 + \gamma) \frac{2\varepsilon_0 K}{L^2} \left(\frac{2e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของคาโทด

m_i เป็นมวลของไอออนบวก

K เป็นค่าคงที่ขึ้นกับ cathode dark space (L) และระยะเฉลี่ยของไอออนบวก (l)

ซึ่งทั้ง L และ l ขึ้นกับความดันแก๊ส จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อความดันแก๊สต่ำมาก ๆ และมี

ค่าเท่ากับ $\left(\pi \frac{1}{2L} \right)^{\frac{1}{2}}$ ที่ความดันแก๊สสูงกว่า 40 มิลลิทอร์

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพโกลวดิสชาร์จ

2.3.1 การให้พลังงานที่มากพอแก่ระบบอย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากกระบวนการผลิตไอออนบวกและการสูญเสียพลังงานของระบบให้กับสิ่งแวดล้อมทั้งในรูปของแสงและความร้อนจำเป็นต้องอาศัยพลังงานภายนอกให้กับระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าในบริเวณ cathode dark space เพื่อที่จะใช้เร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการชนผิวนิวของไอออนบวกให้เข้าสู่บริเวณ negative glow

การเคลื่อนที่ผ่าน cathode dark space จะทำให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานสูงและเป็นตัวการนำพลังงานภายนอกเข้าสู่แหล่งการไอออไนซ์หลักซึ่งอยู่ในบริเวณ negative glow อาจกล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานนำเข้าหลักให้กับสภาพโกลวดิสชาร์จ

2.3.2 กระบวนการชนระหว่างอนุภาค

มีการชนอยู่สองลักษณะคือ การชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น การชนแบบยืดหยุ่นจะมีเฉพาะพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคเท่านั้น ในการชนระหว่างอนุภาคมวล m_i กับอนุภาคมวล m_t การส่งผ่านพลังงานจลน์ระหว่างอนุภาคเป็นไปตามสมการ [14]

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2} \cos^2 \theta \quad (2.10)$$

เมื่อ m_i และ E_{ki} เป็นมวลและพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชน ตามลำดับ

m_t เป็นมวลของอนุภาคที่ถูกชนซึ่งเริ่มต้นหยุดนิ่ง

E_{kt} เป็นพลังงานภายหลังจากการชนของอนุภาค m_t

θ เป็นมุมระหว่างความเร็วของอนุภาคที่เข้าชนกับแนวที่ต่อจุดศูนย์กลางมวลของอนุภาคทั้งสองขณะชน

เรียกอัตราส่วน $\frac{4m_i m_t}{(m_i + m_t)^2}$ ว่าฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน (energy transfer function) ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อ $m_i = m_t$ และค่าต่ำสุดเมื่อ $m_i \ll m_t$ จะเห็นได้ว่าการชนแบบนี้จะส่งพลังงานได้ดีเมื่ออนุภาคมีมวลใกล้เคียงกันเช่น ไอออนบวกกับอะตอมที่เป็นกลางหรืออะตอมด้วยตัวเอง สำหรับการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกหรืออะตอมของแก๊สที่เป็นกลางซึ่งมวลของอนุภาคแตกต่างกันมาก การส่งผ่านพลังงานจลน์จะเกิดขึ้นน้อยมากจะไม่มีเปลี่ยนแปลงความเร็วแต่เปลี่ยนเฉพาะทิศทางเท่านั้น

การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เข้ามาเกี่ยวข้องโดยพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เข้าชนจะส่งผ่านไปเป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชน มีสัดส่วนดังนี้

$$\frac{\Delta U}{E_{ki}} = \frac{m_t}{(m_i + m_t)} \cos^2 \theta \quad (2.11)$$

เมื่อ ΔU เป็นพลังงานภายในของอนุภาคที่ถูกชน
และสัดส่วนพลังงานจลน์ของการชนคือ

$$\frac{E_{kt}}{E_{ki}} = \frac{m_t u_t^2}{m_i} \left[\frac{2m_t u_t}{\frac{m_t}{m_i} (m_i + m_t) u_t^2 + 2\Delta u} \right]^2 \cos^2 \theta \quad (2.12)$$

เมื่อ u_t เป็นอัตราเร็วของอนุภาคที่ถูกชนภายหลังการชน

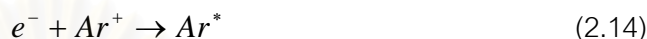
การชนแบบยืดหยุ่นจะมีผลต่อการกระจายพลังงานสำหรับอนุภาคที่เป็นกลางและไอออนบวก สำหรับการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างไอออนบวกกับอนุภาคของแก๊สที่เป็นกลางเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเรียกว่าการชนแบบ symmetric charge transfer อย่างไรก็ตามการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆในโกลวดิสชาร์จเท่านั้นที่เป็นตัวกำหนดลักษณะมหภาคของโกลวกิศจาร์จ

กระบวนการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคอื่นๆในโกลวดิสชาร์จที่สำคัญมีดังนี้

1. กระบวนการไอออไนซ์เซชัน (ionization process) เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่ผลิตคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวกในโกลวดิสชาร์จซึ่งสำคัญต่อกระบวนการรักษาสภาพโกลวดิสชาร์จ เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของแก๊สอาร์กอนถูกชนโดยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงกว่าระดับพลังงานไอออไนซ์ของแก๊สอาร์กอน ตามความสัมพันธ์



2. กระบวนการรวมตัว(recombination process) เป็นกระบวนการย้อนกลับของกระบวนการไอออไนซ์ คืออิเล็กตรอนรวมตัวกับไอออนบวกได้อะตอมที่เป็นกลางอยู่ในสถานะกระตุ้น ทำหน้าที่จำกัดคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวกในโพลีดิสชาร์จ ดังสมการ



3. กระบวนการผ่อนคลาย(relaxation process) เป็นกระบวนการที่อะตอมซึ่งอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นพยายามทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกยกกระดပ်พลังงานกลับลงสู่สถานะเดิมโดยการปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา ดังสมการ



กระบวนการนี้เกิดขึ้นทันทีต่อเนื่องจากการเกิดกระบวนการรวมตัวและกระบวนการกระตุ้นโฟตอนที่เกิดขึ้นทำให้เห็นการเรืองแสงบริเวณการโกลว ความถี่ของแสงขึ้นกับระดับพลังงานอิเล็กตรอนที่ลดลงมาและชนิดของแก๊ส

2.4 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ผิวคาโทด

เมื่อไอออนบวกวิ่งชนผิวคาโทดจะทำให้เกิดกระบวนการหลายอย่าง กระบวนการที่สำคัญในการรักษาสภาพโพลีดิสชาร์จ คือ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกป้อนให้ระบบและเป็นตัวเริ่มกระบวนการไอออไนซ์ทำให้เพิ่มคู่อิเล็กตรอน-ไอออนบวก สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากผิวคาโทด(จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวคาโทดต่อการชนของไอออนบวกหนึ่งครั้ง : γ) จะเป็นตัวกำหนดลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ในสภาพโพลีดิสชาร์จ

ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีดังนี้

1. ชนิดคาโทดที่ถูกชน
2. ชนิดและพลังงานของไอออนบวก
3. สภาพและระนาบของผิวหน้า

4. ชนิดของบรรยากาศที่ปกคลุมผิวหน้า(แก๊สที่ใช้ในการสเปกโตรริง)
5. อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากการชนของไอออนบวกและมีพลังงานไม่สูงมากนักขึ้นกับพลังงานและชนิดของไอออนบวกที่ชน

2.5 สภาพโกลวดิสชาร์จภายใต้สนามแม่เหล็ก

การเกิดสภาพโกลวดิสชาร์จในสภาพความดันต่ำต้องใช้ความต่างศักย์ในการดิสชาร์จสูงแต่ให้กระแสการดิสชาร์จต่ำ เมื่อนำไปใช้งานสเปกโตรริงจะให้อัตราการเคลือบฟิล์มต่ำและกระแสดิสชาร์จต่ำยังสูงผลให้วัสดุรองรับมีความร้อนสูงเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง เพราะภายใต้ความดันต่ำอิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปอาโนดโดยมีการชนกับอะตอมอื่นน้อยมาก

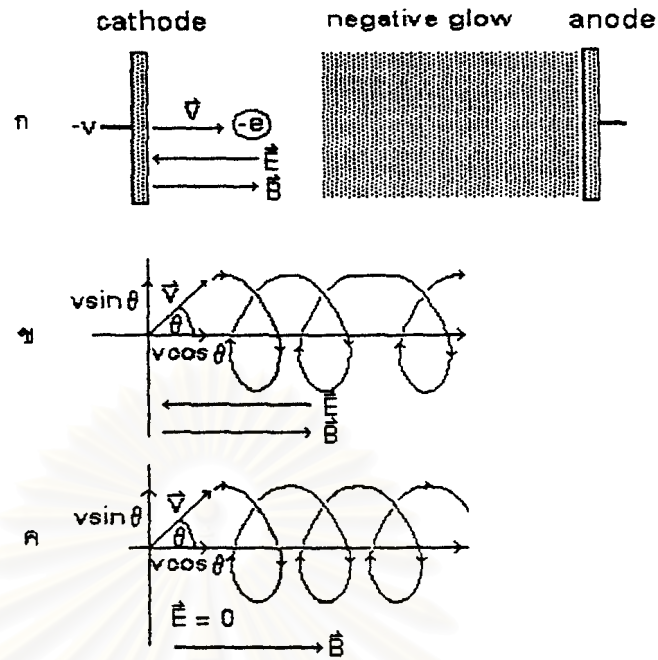
การใส่สนามแม่เหล็กในสภาพโกลวดิสชาร์จสามารถเพิ่มการไอออไนซ์ของแก๊สและสภาพนำไฟฟ้าของสภาพโกลวดิสชาร์จสูงขึ้น เพราะสนามแม่เหล็กทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสภาพโกลวดิสชาร์จเปลี่ยนไป ตามสมการแรงลอเรนซ์[16]

$$\vec{F} = m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.16)$$

เมื่อ e, m_e และ \vec{v} เป็นค่าประจุ, มวล และความเร็วของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

2.5.1 การใส่สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวคาโทด

เมื่อใส่สนามแม่เหล็กขนาดความเข้มคงที่ในทิศตั้งฉากกับคาโทด สนามแม่เหล็กจะมีทิศขนานกับสนามไฟฟ้าใน cathode dark space อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศที่ไม่ขนานกับสนามแม่เหล็กจะถูกสนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่ตามแรงลอเรนซ์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบ helix และมีระยะ pitch มากขึ้นเรื่อยๆ เข้าสู่อาโนดดังรูปที่ 2.8 เมื่อเข้าสู่บริเวณ negative glow สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ อิเล็กตรอนยังคงเคลื่อนที่แบบ helix แต่ระยะ pitch คงที่เข้าสู่อาโนด

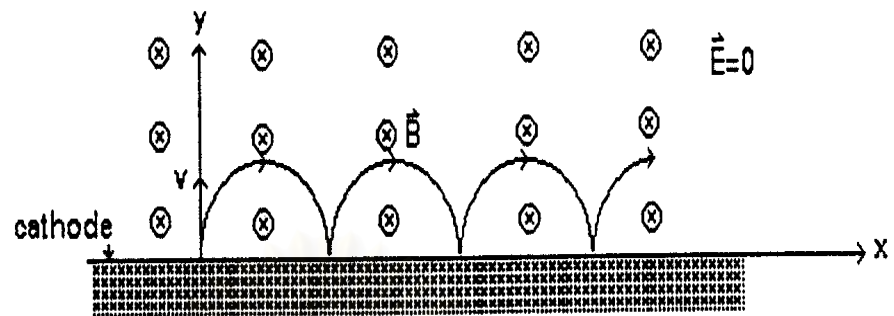


รูปที่ 2.8 อิทธิพลของสนามไฟฟ้า(\vec{E}) และสนามแม่เหล็ก(\vec{B})ต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

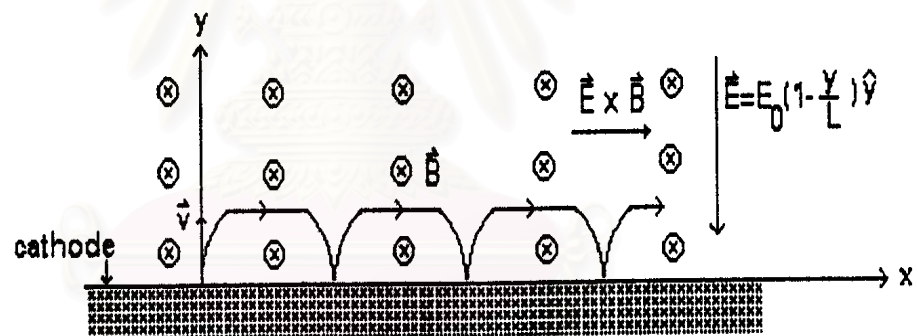
- ก. อิเล็กตรอนถูกเร่งตรงไปยังแอโนดเมื่อ \vec{B} ขนานกับ \vec{E} และ $\theta = 0$
- ข. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะเวลา pitch เพิ่มขึ้นเมื่อ \vec{B} ขนานกับ \vec{E} และ $\theta \neq 0$
- ค. อิเล็กตรอนโคจรเป็น helix ระยะเวลา pitch คงที่เมื่อ $\vec{B} \perp \vec{E}$ และ $\theta = 90^\circ$ [11]

2.5.2 การใส่สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวคาโทด

พิจารณาอิเล็กตรอนหลุดจากคาโทดในทิศตั้งฉากเข้าสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กทิศขนานกับคาโทด หากไม่มีสนามแม่เหล็กอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมแล้วสะท้อนผิวคาโทดเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.9 กรณีเดียวกันเมื่อพิจารณาแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าบริเวณ cathode dark space พุ่งเข้าคาโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นครึ่งวงกลมแบบไซคลอยด์(cycloidal)ดังรูปที่ 2.10 ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณ negative glow ซึ่งสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ก็จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเข้าสู่บริเวณ negative darke space ในที่สุด กระบวนการนี้เป็นการกักอิเล็กตรอนบริเวณผิวคาโทด ทำให้แก๊สบริเวณนี้ถูกไอออไนซ์มากกว่าบริเวณอื่นและช่วยลดสัดส่วนกระแสอิเล็กตรอนต่อกระแสไอออนบวกด้วย เพราะการเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับผิวคาโทดลดลง



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวคาโทดด้วยความเร็ว v เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ซึ่งมีทิศขนานกับผิวของคาโทด (พุ่งเข้าหาหน้ากระดาษ) และสมมติว่าไม่มีกระแสไฟฟ้า[11]



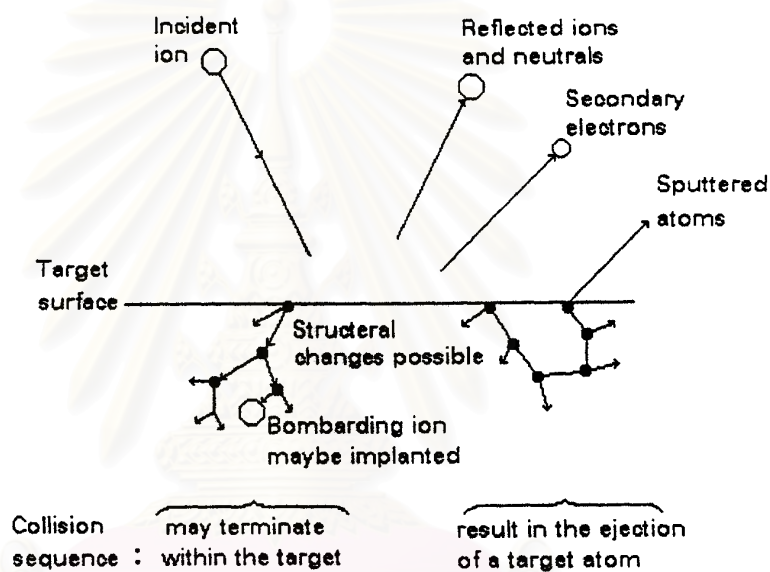
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทิวติยภูมิซึ่งหลุดจากผิวคาโทดด้วยความเร็ว v เข้าสู่บริเวณของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ซึ่งมีความเข้มคงที่และขนานกับผิวของคาโทด(พุ่งเข้าหน้ากระดาษ)และสนามไฟฟ้าซึ่งลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางจากคาโทดและมีทิศพุ่งเข้าสู่คาโทด[11]

บทที่ 3

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพโกลวดิสชาร์จ โดยมีไอออนบวกเป็นตัวสปัตเตอริง(sputter) และมีวัสดุที่ใช้ทำคาโทดเป็นเป้า(target) เมื่อเป้าถูกชนด้วยไอออนบวกพลังงานสูงจนทำให้อะตอมของเป้าบางส่วนหลุดออกมารวมทั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เรียกกระบวนการนี้ว่า สปัตเตอริง(sputtering)

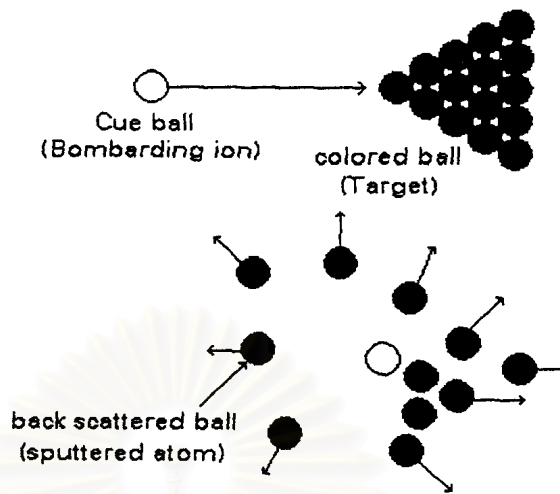
3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปัตเตอริง



รูปที่ 3.1 กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกชนผิวเป้า[10]

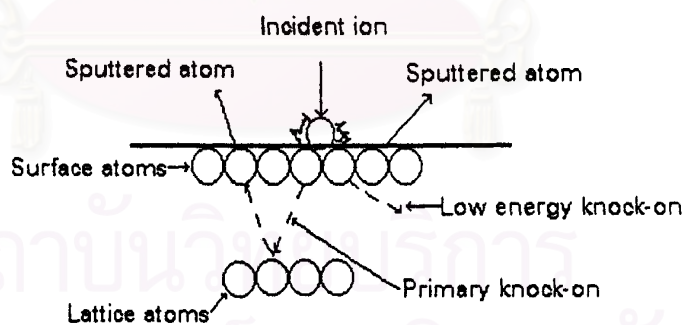
เมื่อเป้าที่เป็นของแข็งถูกชนโดยไอออนบวกจะเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 3.1 คือ

- ไอออนบวกที่เข้าชนสะท้อนกลับ หรือถูกทำให้เป็นกลาง
- มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron emission)
- ไอออนบวกที่เข้าชนมีการฝังตัวในเป้า(ion implantation)
- มีการจัดโครงสร้างใหม่ภายในเป้า
- มีการชนอย่างต่อเนื่อง(collision cascade)ระหว่างอะตอมของเป้าแล้วทำให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของเป้าถูกกระแทกให้หลุดออก



รูปที่ 3.2 การสputteringเปรียบเทียบกับการเล่นบิลเลียด[8]

การสputteringเทียบได้กับการชนของลูกบิลเลียดดังรูปที่ 3.2 ไอออนบวกเทียบได้กับ cue ball อะตอมของผิวเป้าเทียบได้กับ colored ball ที่เรียงเป็นระเบียบ การชนจะมีการถ่ายทอดพลังงานระหว่างไอออนบวกกับอะตอมของเป้า และระหว่างอะตอมของเป้าด้วยกันเอง ถือเป็นารชนแบบยืดหยุ่นสามารถอธิบายได้โดยฟังก์ชันการส่งผ่านพลังงาน



รูปที่ 3.3 การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสputtering[8]

การที่ไอออนบวกชนเป้าแล้วถ่ายทอดโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวของเป้าที่อยู่ข้างบนกลไกที่นำไปสู่การสputteringอะตอมของผิวเปื่อดังรูปที่ 3.3 มีการชนสองลักษณะที่เกิดขึ้นคือ แบบแรกอะตอมถูกชนในลักษณะ low energy knock-on องค์ประกอบโมเมนตัมส่วนใหญ่อยู่ในแนวขนานผิวเป้า มีการเคลื่อนที่ในแนวเฉียงกระแทกด้านข้างอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกมาซึ่งเป็นการชนเพียงครั้งเดียว

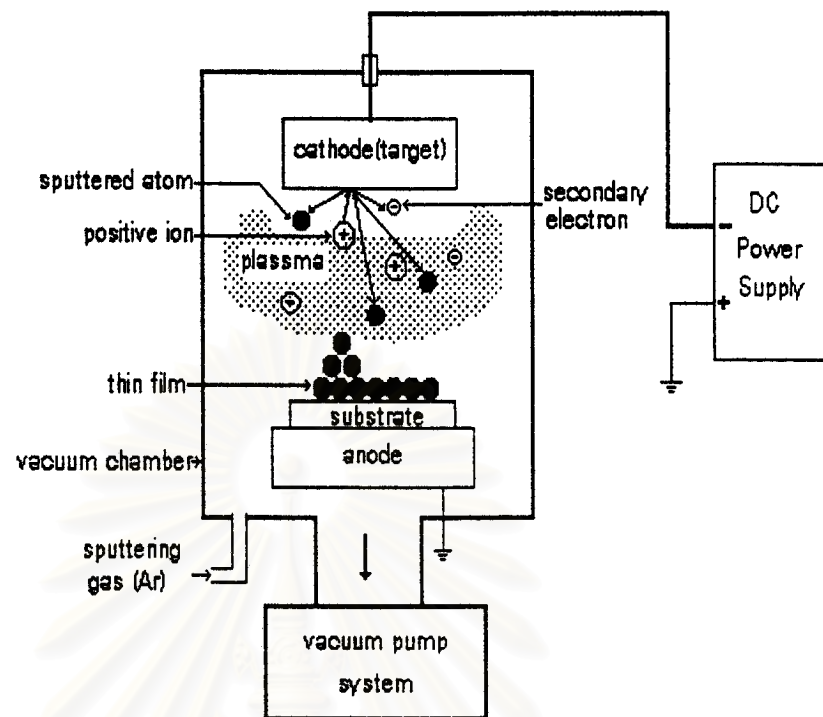
แบบที่สองอะตอมถูกชนในลักษณะ primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่อยู่ในทิศพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมเคลื่อนที่ไปชนอะตอมในชั้นถัดไปทำให้ตัวมันสะท้อนกลับไปชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมา หรือมีการชนอย่างต่อเนื่องจนทำให้อะตอมได้รับโมเมนตัมในทิศเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับของไอออนบวกที่เข้าชนอะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกในที่สุด

3.2 การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีอีวีแมกนิตรอนสปัตเตอริง

เป็นการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริงภายใต้ระบบโกลวดิสชาร์จซึ่งเป็นระบบดีสปัตเตอริงโดยไฟฟ้าโดยตรง รวมทั้งการใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสปัตเตอริงด้วย เป็นระบบที่ใช้งานง่ายและเหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มบางของโลหะ

ระบบทั้งหมดประกอบด้วยเป้าสำหรับสปัตเตอริงซึ่งเป็นวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มทำหน้าที่เป็นขั้วคาโทด วัสดุรองรับวางห่างจากเป้าประมาณ 6 เซนติเมตร ส่วนประกอบทั้งหมดอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศที่ถูกบีบตลอดเวลา แก๊สที่เป็นตัวสปัตเตอริง(งานวิจัยนี้ใช้แก๊สอาร์กอน)จะถูกปั๊มเข้าภาชนะสุญญากาศจนถึงช่วงความดันใช้งาน(งานวิจัยนี้ใช้ในช่วง 2×10^{-3} ถึง 8×10^{-3} mbar) เมื่อปั๊มความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างเป้ากับอาโนดจนกระทั่งเกิดโกลวดิสชาร์จที่สามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จได้เอง เมื่อไอออนบวกชนเป้าจะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งทำหน้าที่การรักษาสภาพโกลวดิสชาร์จและการสปัตเตอริงเป้า อะตอมเป้าที่หลุดออกมาจะเคลื่อนที่แบบสุ่มโดยบางส่วนสามารถไปถึงวัสดุรองรับและก่อตัวเป็นฟิล์มบางขึ้นในที่สุดแสดงดังรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



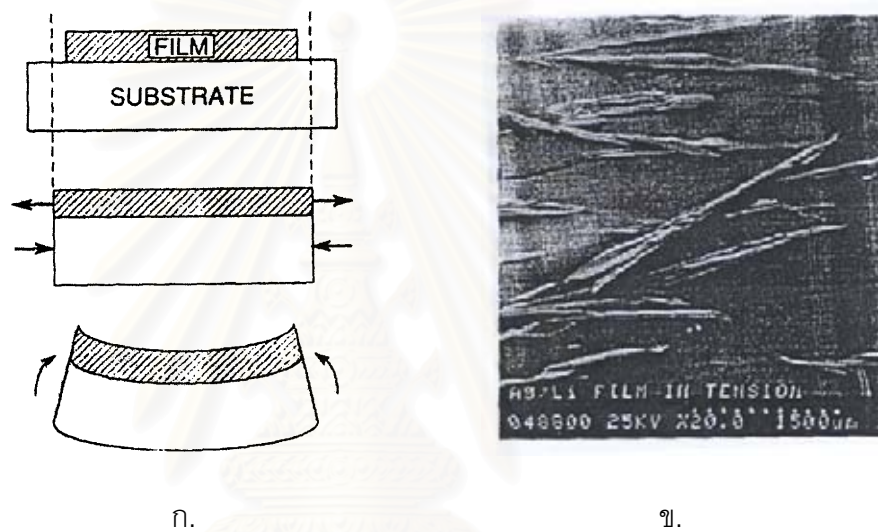
รูปที่ 3.4 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง[11]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

4.1 ความเค้นตกค้าง

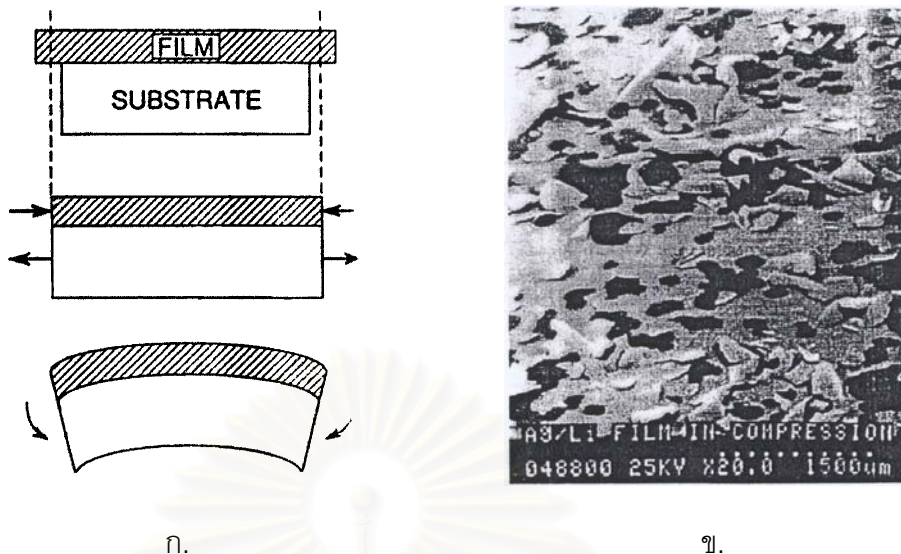
ความเค้นตกค้าง(residual stress)ภายในฟิล์มมีผลทำให้ฟิล์มเกิดความเสียหายขึ้นได้ เช่น ทำให้ฟิล์มหลุดจากวัสดุรองรับ หรือทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตกขึ้น[14] แบบจำลองการเกิดความเค้นภายในฟิล์มขณะเคลือบฟิล์มลงบนวัสดุรองรับแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง silver lithium ภายใต้ความเค้นดึง[14]

- ก. แบบจำลองของฟิล์มภายใต้ความเค้นดึง
- ข. ลักษณะของฟิล์มลอกเนื่องจากความเค้นดึง

จากรูปที่ 4.1 ก) แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางภายใต้ความเค้นตกค้างดึง (residual tensile stress) ในขณะที่เกิดการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุรองรับเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุรองรับมากกว่าฟิล์มบาง ทำให้วัสดุรองรับออกแรงดึงฟิล์มบางให้ยืดออกฟิล์มบางจึงอยู่ภายใต้ความเค้นค้างดึง และในขณะเดียวกันฟิล์มบางออกแรงอัดวัสดุรองรับให้หดเข้าทำให้วัสดุรองรับอยู่ภายใต้ความเค้นอัด มีผลทำให้เกิดการลอกหลุดของฟิล์มบางจากวัสดุรองรับในลักษณะที่ปลายทั้งสองข้างโค้งขึ้นดังรูปที่ 4.1 ข)

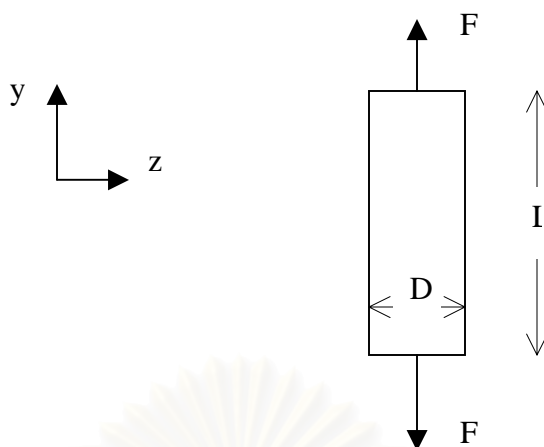


รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง silver lithium ภายใต้ความเค้นอัด[14]

- ก. แบบจำลองของฟิล์มภายใต้ความเค้นดึง
 ข. ลักษณะของฟิล์มลอกเนื่องจากความเค้นอัด

จากรูปที่ 4.2 ก) แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางภายใต้ความเค้นตึงค้างอัด (residual compressive stress) ในขณะที่เกิดการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุรองรับเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุรองรับน้อยกว่าฟิล์มบาง ทำให้วัสดุรองรับถูกฟิล์มบางออกแรงดึงวัสดุรองรับให้ยืดออกทำให้วัสดุรองรับอยู่ภายใต้ความเค้นดึง และในขณะเดียวกันวัสดุรองรับออกแรงอัดฟิล์มบางเพื่อให้ฟิล์มบางหดเข้า ดังนั้นฟิล์มบางจึงอยู่ภายใต้ความเค้นอัด มีผลทำให้เกิดการลอกหลุดของฟิล์มบางจากวัสดุรองรับในลักษณะที่ปลายทั้งสองข้างโค้งขึ้นดังรูปที่ 4.2 ข)

ความเค้นตึงค้างที่เกิดขึ้นภายในฟิล์มบางสามารถคำนวณหาค่าได้โดยการวิเคราะห์ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการวัดระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มบางโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[17]



รูปที่ 4.3 แท่งทรงกระบอกถูกแรง F กระทำในแนวแกน y

พิจารณาแท่งทรงกระบอกดังรูปที่ 4.3 มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ A ถูกแรง F กระทำตามแกน y ทำให้ความยาวเปลี่ยนจาก L_0 เป็น L และเส้นผ่านศูนย์กลางเปลี่ยนจาก D_0 เป็น D เนื่องจากฟิล์มบางมากจึงไม่มีความเค้นตามแนวแกน x และ z ให้ σ_y แทนความเค้นตามแนวแกน y และ ε_y แทนความเครียดตามแนวแกน y [17]

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \quad (4.1) \text{ และ}$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (4.2)$$

เมื่อ L_0 และ L_f เป็นความยาวก่อนและหลังจากการถูกแรง F กระทำ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุกค์ดังนี้

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (4.3) \text{ เมื่อ}$$

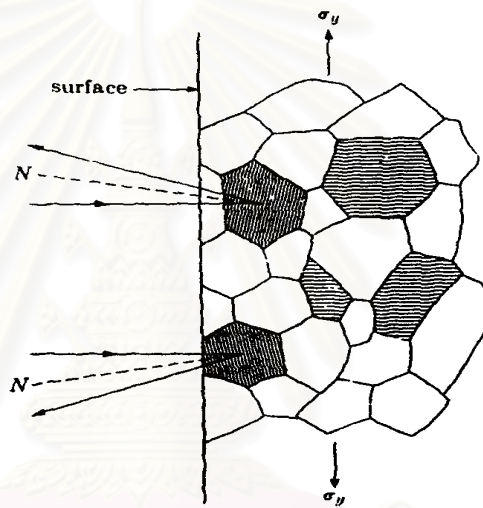
E แทนค่าของ young's modulus

ในทิศของแกน x และ z ยังคงมีความเครียดเกิดขึ้นและมีความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามแนวแกน y ตามสมการ

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = \frac{D}{D_0} = \frac{D_f - D_0}{D_0} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_y \quad (4.5)$$

เมื่อ ε_x และ ε_z แทนความเครียดตามแนวแกน x และ z ตามลำดับ
 D_0 และ D_f แทนความกว้างก่อนและหลังจากถูกแรง F กระทำ
 และ ν แทน poisson's ratio



รูปที่ 4.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซุตระนาบ hkl ในโครงสร้างฟิล์มภายใต้ความเค้น[17]

การวัดความเครียดตามแนวแกน z โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้ทราบค่าของระยะห่างระหว่างระนาบ(d)ในทิศทางตามแกน z ความเครียดตามแนวแกน z มีค่าตามสมการ (4.6)

$$\varepsilon_z = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (4.6)$$

เมื่อ d_0 และ d_n แทนระยะห่างระหว่างก่อนและหลังการเกิดความเครียดขึ้นภายในฟิล์ม โดยที่ $d_0 = 2.225 \text{ \AA}$ สำหรับฟิล์มบางโมลิบดีนัม

จากสมการ(4.5)

$$\varepsilon_y = -\frac{1}{\nu} \left(\frac{d_n - d_0}{d_0} \right) \quad (4.7) \text{ จาก}$$

สมการ(4.3)

$$\sigma_y = -\frac{E}{\nu} \left(\frac{d_n - d_0}{d_0} \right) \quad (4.8)$$

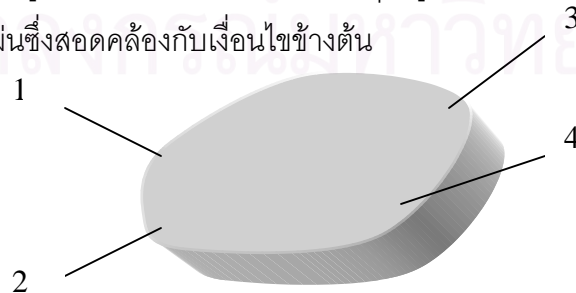
โดยที่ $E = 329 \text{ GPa}$ และ $\nu = 0.33$ สำหรับฟิล์มบางโมลิบดีนัม

4.2 สภาพต้านทานไฟฟ้า

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการสปีดเตอร์ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถวัดได้โดยวิธีแบบแวนเดอร์เพาว์(van der Pauw)[18] สามารถที่จะใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ความถูกต้องแม่นยำของวิธีแบบแวนเดอร์เพาว์ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสจะต้องวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณารูปร่างชิ้นสารแบบแผ่นแบนใดๆดังรูปที่ 4.5 มีขั้วสัมผัสเล็กๆ 1,2,3 และ 4 ที่กระจายอยู่ที่ขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 4.5 แสดงขั้วสัมผัสทั้งสี่ขั้วบนตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใดๆ

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าออกที่ขั้ว 1,2 และวัดความต่างศักย์ที่ขั้ว 3,4 จะได้ความต้านทาน R_{1234} ดังสมการ

$$R_{1234} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4.9)$$

ทำนองเดียวกันป้อนกระแสเข้าออกที่ขั้ว 2,3 และวัดความต่างศักย์ที่ขั้ว 4,1 จะได้ความต้านทาน R_{2341} ดังสมการ

$$R_{2341} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (4.10)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\exp\left(-\frac{\pi R_{1234} d}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{\pi R_{2341} d}{\rho}\right) = 1 \quad (4.11)$$

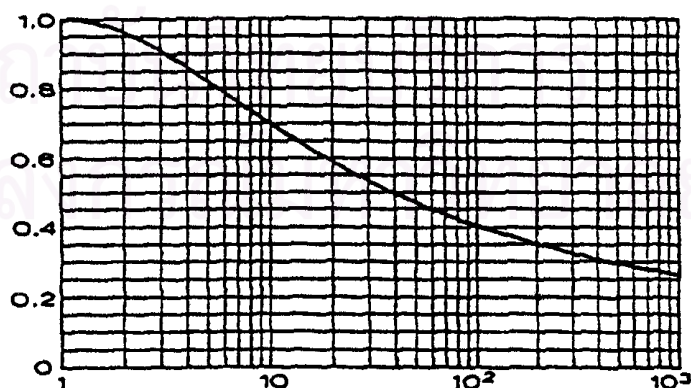
จากสมการ(4.11) แวนเดอร์เพอร์สามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นจริงสำหรับแผ่นสารรูปร่างใดๆ และหากทราบค่า d , R_{1234} และ R_{2341} สามารถลดรูปสมการที่(4.11)ได้เป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[\frac{R_{1234} + R_{2341}}{2} \right] f\left(\frac{R_{1234}}{R_{2341}}\right) \quad (4.12)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสาร

$f\left(\frac{R_{1234}}{R_{2341}}\right)$ คือ ค่าปรับแก้ (correction factor) ขึ้นกับอัตราส่วนของ $\frac{R_{1234}}{R_{2341}} = Q$

ดังรูปที่ 4.6

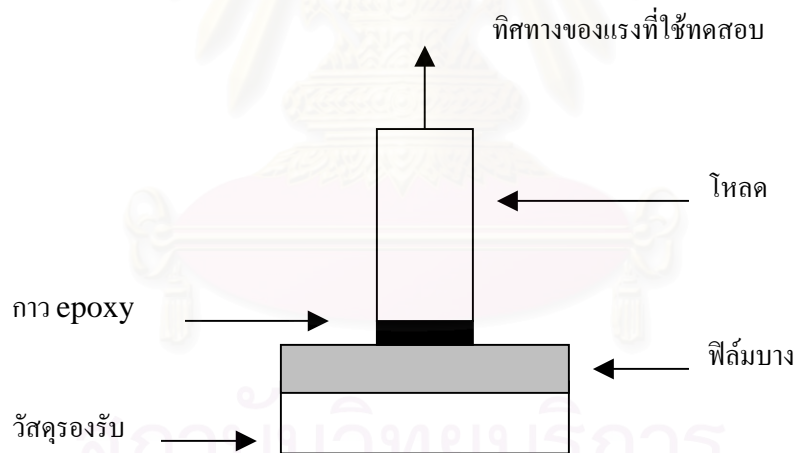


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ f และ Q [19]

4.3 สภาพการยึดติด

เนื่องจากฟิล์มบางโพลีคาร์บอเนตเป็นฟิล์มบางชั้นแรกที่เคลือบลงบนวัสดุรองรับ สภาพการยึดติดของฟิล์มบางจึงเป็นสมบัติที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงเพราะในการที่จะได้เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนทั้งต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน และผ่านกระบวนการทางเคมีดังนั้นสภาพการยึดติดของฟิล์มบางจะต้องสูงพอที่จะทำให้ฟิล์มบางผ่านขั้นตอนจนเสร็จสิ้นโดยที่ไม่ลอกหลุดออกจากวัสดุรองรับ

การทดสอบสภาพการยึดติดสามารถทดสอบได้โดยวิธีการดึงจนหลุด (pull-off) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบและสามารถทราบค่าสภาพการยึดติดในรูปของแรงต่อพื้นที่หน้าตัดของโหนดที่ใช้ดึงฟิล์มบางในทิศตั้งฉากกับฟิล์มบางจนฟิล์มบางหลุดออกจากวัสดุรองรับ ดังรูปที่ 4.7 โดยที่โหนดซึ่งเป็นแท่งโลหะทองเหลืองเชื่อมติดกับฟิล์มบางด้วยกาว epoxy

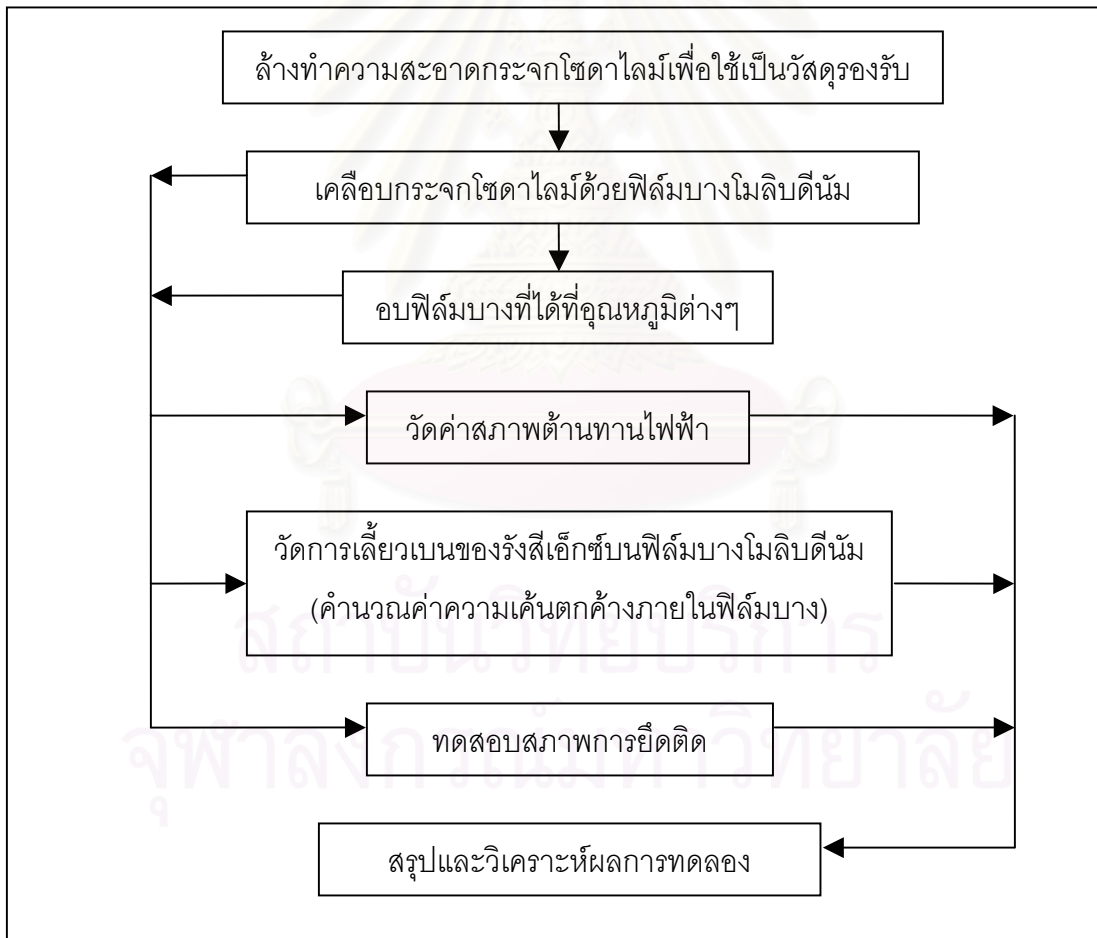


รูปที่ 4.7 การทดสอบสภาพการยึดติด

บทที่ 5

วิธีดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการล้างทำความสะอาดกระจกโซดาไลม์ซึ่งใช้เป็นวัสดุรองรับและ
อบกระจกที่อุณหภูมิประมาณ 70°C ก่อนนำเข้าระบบสุญญากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สเป็คเตอร์
ฟิล์มบางโมลิบดีนัมเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนิตรอนสเป็คเตอร์ที่มีความดันเท่ากับ 5×10^{-6} mbar ด้วยการส
เป็คเตอร์แก๊สอาร์กอนที่มีความดันต่างๆ ภายหลังจากเตรียมฟิล์มบางเสร็จแบ่งฟิล์มบางที่ได้นำไปทำ
การอบ(anneal) ที่อุณหภูมิต่างๆภายในภาชนะสุญญากาศ หลังจากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาวิเคราะห์
สมบัติต่างๆดังนี้ 1) สภาพต้านทานไฟฟ้า 2) ความเค้นตักภายในฟิล์ม และ 3) สภาพการยึดติด
ขั้นตอนการทดลองสรุปได้ตามแผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

5.1 การเตรียมวัสดุรองรับ

เตรียมกระจกโซดาไลม์ขนาด 5 x 6 เซนติเมตรเพื่อเป็นวัสดุรองรับ ทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน จากนั้นทำความสะอาดด้วยการเขย่าในอ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) โดยใช้น้ำปราศจากไอออน (de-ionized water) 3 ครั้ง ครั้งแรกผสมน้ำยาล้างจานและสองครั้งสุดท้ายใช้เฉพาะน้ำปราศจากไอออนเพื่อล้างน้ำยาล้างจานออกให้หมด จากนั้นทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนแล้วนำลงแช่กรดโครมิกนานอย่างน้อย 12 ชั่วโมงเพื่อทำความสะอาดผิวหน้ากระจก นำกระจกขึ้นจากกรดแล้วทำความสะอาดด้วยการเขย่าในอ่างอัลตราโซนิก โดยใช้น้ำปราศจากไอออน 3 ครั้ง เพื่อล้างกรดออกให้หมดจากนั้นทำให้แห้งโดยการเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมงเพื่อเป็นการไล่ความชื้น เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำไปติดตั้งในภาชนะสุญญากาศเพื่อเตรียมการ สปีดเตอริงต่อไป

5.2 การเคลือบฟิล์มบางโมลิบดีนัม

5.2.1 ฟิล์มชนิดชั้นเดียว

ภาชนะสุญญากาศจะถูกทำให้ความดันต่ำเท่ากับ 5.0×10^{-6} มิลลิบาร์ จึงเริ่มการ สปีดเตอริง เริ่มจากการนำแก๊สอาร์กอนเข้าระบบซึ่งความดันที่ใช้แต่ละครั้งมีค่าดังนี้ 2.0×10^{-3} , 3.0×10^{-3} , 4.0×10^{-3} , 5.0×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 7.0×10^{-3} และ 8.0×10^{-3} มิลลิบาร์ เรียกฟิล์มบางที่ได้ว่าฟิล์มชนิดชั้นเดียว โดยสปีดเตอริงด้วยกระแส 1.0 A ความต่างศักย์โดยประมาณ 450 โวลต์ ฟิล์มบางที่มีความหนา 0.25 ไมโครเมตร ใช้เวลาสปีดเตอริงนาน 6 นาที ก่อนที่จะนำฟิล์มออกทิ้งไว้ในระบบสุญญากาศประมาณ 30 นาทีเพื่อให้ฟิล์มลดอุณหภูมิลง โดยแต่ละครั้งการทดลองจะได้ฟิล์มบางโมลิบดีนัมจำนวน 4 ตัวอย่าง แบ่งนำไปวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม 1 ตัวอย่างและที่เหลืออีกสามตัวอย่างนำไปทำการอบ (anneal)

5.2.2 ฟิล์มชนิดสองชั้น

ฟิล์มชนิดสองชั้นหมายถึงแบ่งฟิล์มชนิดชั้นเดียวหนา 0.25 ไมโครเมตรออกเป็นสองชั้น โดยชั้นแรกใช้ความดันแก๊สอาร์กอนที่ทำให้ฟิล์มยึดติดกับกระจกได้ดีและชั้นที่สองใช้ความดันแก๊สอาร์กอนที่ให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานต่ำ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS และสปีดเตอริงด้วยกระแส 1.0 A ความต่างศักย์โดยประมาณ 450 โวลต์ เช่นเดียวกับฟิล์มบางชนิดชั้นเดียว การเลือกความดันแก๊สที่เหมาะสมขึ้นกับผลการทดลองของฟิล์มชนิดชั้นเดียว โดยกำหนดแนวทางวิจัยถึงผลของความหนาของฟิล์มชั้นแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้สปีดเตอริงที่ 20 ,

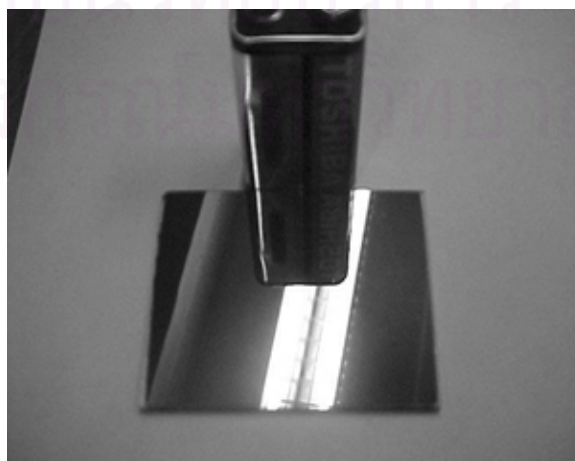
30 , 40 , 50 , 60 , 120 และ 180 วินาทีแล้วใช้ความดันแก๊สอาร์กอนที่ทำให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำทำการสับเตออร์ต่อจนครบ 6 นาที นำฟิล์มที่ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มตามขั้นตอนรูปที่ 5.1

5.3 ลักษณะฟิล์มที่ได้จากการสับเตออร์

รูปที่ 5.2 แสดงฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ได้จากการสับเตออร์จริงที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 2.0×10^{-3} mbar และ 3.0×10^{-3} mbar ฟิล์มที่ได้มีลักษณะลอกหลุดออกจากกระจก ผิวฟิล์มแตกขรุขระ เช่นเดียวกับฟิล์มที่อยู่ภายใต้ความเค้นอัดตามรูปที่ 4.2 และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.6.2 แสดงว่าความดันแก๊สอาร์กอนในช่วง 2.0×10^{-3} mbar ถึง 8.0×10^{-3} mbar ที่ใช้ทำให้ฟิล์มอยู่ภายใต้ความเค้นอัด ซึ่งในงานวิจัยของ D.W. Hoffman[15] พบว่าที่ความดันแก๊สต่ำฟิล์มลอกออกจากวัสดุรองรับเนื่องจากความเค้นอัด รูปที่ 5.3 แสดงฟิล์มที่ได้จากการสับเตออร์จริงที่ความดันแก๊สอาร์กอน 4.0×10^{-3} mbar ถึง 8.0×10^{-3} mbar ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเงาสะท้อนแสง ผิวเรียบสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.2 ลักษณะของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ลอกออกจากกระจก ผิวฟิล์มแตก ขรุขระ



รูปที่ 5.3 ลักษณะของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีสภาพการยึดติดดี ผิวเรียบ เป็นเงาสะท้อนแสง

5.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

5.4.1 การเตรียมฟิล์มเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ตัดฟิล์มที่ได้จากการสเป็คเตอริให้มีขนาดประมาณ 1x1 ตารางเซนติเมตรจำนวน 30 ชิ้น ดังรูปที่ 5.4 โดยตัวเลข 1 ถึง 6 และตัวอักษร S1 ถึง S5 เป็นคู่อันดับแสดงตำแหน่งของฟิล์มบนกระจก นำฟิล์มที่ตัดได้ไปวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

					S1
					S2
					S3
					S4
1	2	3	4	5	6/S5

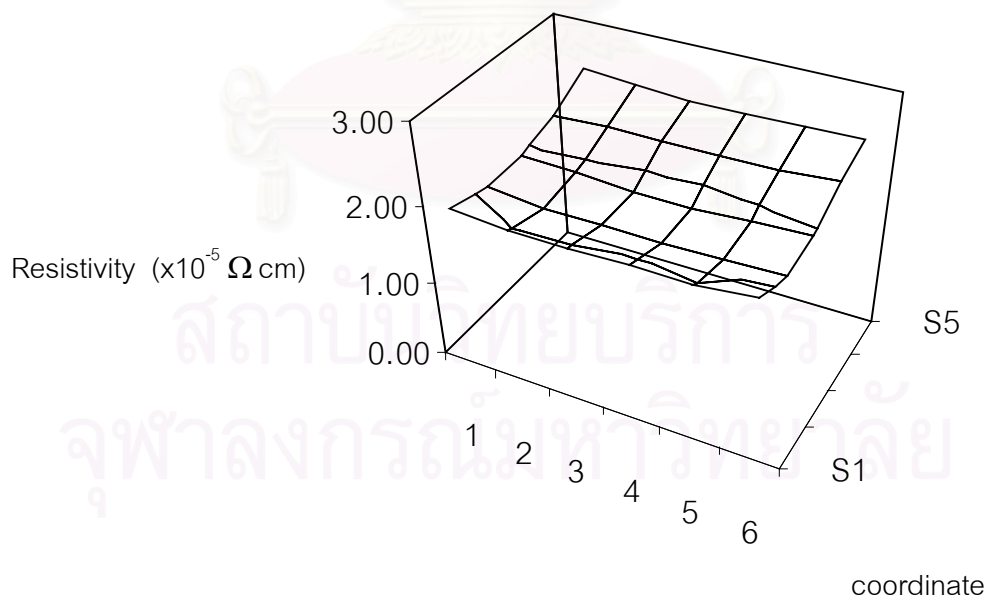
รูปที่ 5.4 การแบ่งฟิล์มเพื่อทำการวัดค่าสภาพต้านทานและคู่อันดับแสดงตำแหน่ง

5.4.2 ผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

ฟิล์มที่ได้จากการสเป็คเตอริงถูกแบ่งออกเป็น 30 ชิ้นต่อกระจกหนึ่งแผ่น มีลักษณะการกระจายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนกระจกตามรูปที่ 5.5 แสดงผลการเตรียมฟิล์มบางโมลิบดีนัมด้วยความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar ของตัวอย่าง M1P41 การกระจายตัวดังกล่าวเป็นผลมาจากตำแหน่งของการจัดวางเป้าโมลิบดีนัมและกระจกทำให้บริเวณกลางแผ่นกระจกเป็นบริเวณที่ใกล้กับการสเป็คเตอริมากที่สุดทำให้ได้ฟิล์มที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ โดยที่ทุกความดันแก๊สที่ใช้ในการสเป็คเตอริมีลักษณะการกระจายค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้าคล้ายคลึงกัน และ รูปที่ 5.6 แสดงผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของ M1P41 ที่ใช้ความดันแก๊สอาร์กอน 4.0×10^{-3} mbar ในลักษณะพื้นผิว ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวอย่าง M1P41 เท่ากับ $(2.12 \pm 0.11) \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$

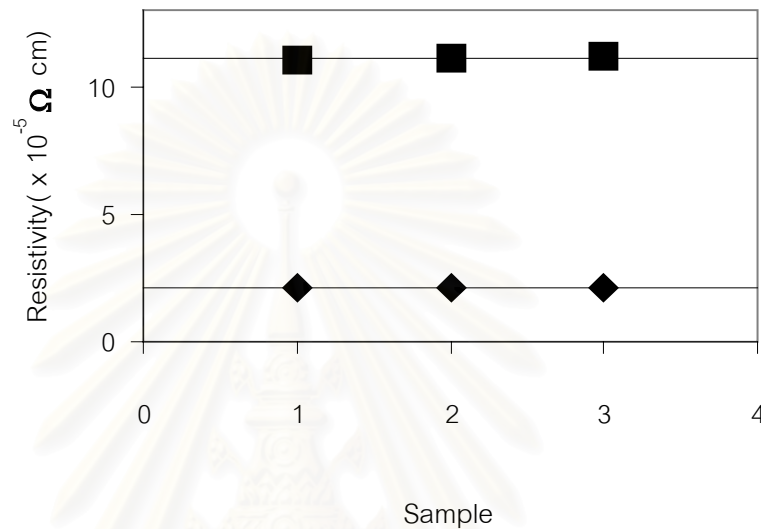
2.32	2.27	2.15	2.15	2.18	2.26	S1
1.95	1.88	1.89	1.88	1.88	1.91	S2
1.96	1.94	1.89	1.87	1.92	1.96	S3
2.22	2.16	2.15	2.15	2.16	2.21	S4
2.42	2.34	2.32	2.33	2.34	2.43	S5
1	2	3	4	5	6	

รูปที่ 5.5 การกระจายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าบนกระจกในหน่วย $10^{-5} \Omega \text{ cm}$ ของ M1P41 फिल्मสปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน $4.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$



รูปที่ 5.6 การกระจายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบพื้นผิวของ M1P41 फिल्मสปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน $4.0 \times 10^{-3} \text{ mbar}$

การเตรียมฟิล์มโดยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงมีความสามารถเตรียมฟิล์มให้มีสมบัติใกล้เคียงกันได้ใน การสปัตเตอริงแต่ละครั้ง โดยรูปที่ 5.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมได้จากการสปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar และ 8×10^{-3} mbar ทั้งสามครั้งโดยที่เส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของแต่ละความดันแก๊ส มีค่าเท่า $2.12 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ และ $11.06 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ ตามลำดับ



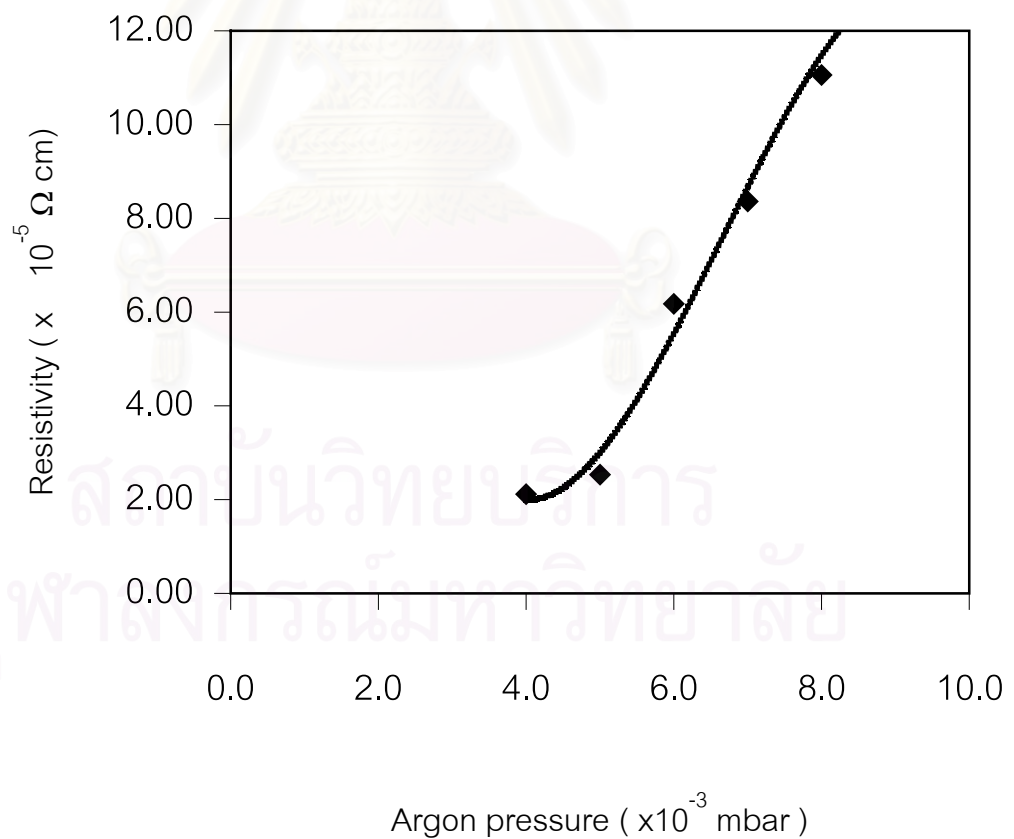
รูปที่ 5.7 ผลการวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอริงซ้ำในแต่ละครั้ง

- สปัตเตอริงที่ความดันแก๊สอาร์กอน 8.0×10^{-3} mbar
- ◆ สปัตเตอริงที่ความดันแก๊สอาร์กอน 4.0×10^{-3} mbar

ผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสปัตเตอริงแสดงในตารางที่ 5.1 จากการทดลองพบว่าเมื่อสปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอนสูงขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าการสปัตเตอริงที่ความดันแก๊สอาร์กอนที่ต่ำกว่า โดยฟิล์มที่สปัตเตอริงด้วยความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ $2.12 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ และ ที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8×10^{-3} mbar ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $11.06 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ ผลจากตารางที่ 5.1 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มกับความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสปัตเตอริงได้ดังรูปที่ 5.8

Argon pressure ($\times 10^{-3}$ mbar)	Average resistivity ($\times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$)	Standard deviation ($\times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$)
4.0	2.12	0.11
5.0	2.53	0.12
6.0	6.17	0.13
7.0	8.36	0.19
8.0	11.06	0.53

ตารางที่ 5.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของฟิล์มที่สปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานเฟวเคลือบกับความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้สปีดเตอร์ เส้นโค้งภายในรูปแสดงถึงแนวโน้มของข้อมูล

ตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสับเตอรต์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนสูงฟิล์มที่ได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าการสับเตอรต์ที่ความดันแก๊สต่ำกว่า เมื่อความดันแก๊สสูงขึ้นจำนวนอนุภาคของแก๊สต่อปริมาตรสูงขึ้นจึงทำให้ระยะอิสระเฉลี่ย(mean free path)มีค่าน้อยลง[12]ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอะตอมมากขึ้น อะตอมบางส่วนจึงไม่ได้เข้าชนกระจกในทิศตั้งฉากกับผิวกระจก อะตอมตกกระทบกระจกเป็นมุมเอียงใดๆทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในฟิล์ม [13,14,21,22] มีผลให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น ในขณะที่ความดันต่ำฟิล์มเกิดช่องว่างภายในน้อยกว่าอะตอมมีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจึงลดลง จนกระทั่งที่ความดันแก๊สอาร์กอนตั้งแต่ 3.0×10^{-3} mbar ลงไป อะตอมมีการเรียงตัวกันอัดแน่นมากส่งผลให้มีความเค้นอัดทำให้ฟิล์มลอกออกจากกระจกในลักษณะตามรูปที่ 5.2 เมื่อเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยของ ฐนุสิทธิ์ [11] และ Scofield [21,22] ผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสับเตอรต์มีลักษณะเช่นเดียวกับของงานวิจัยนี้กล่าวคือเมื่อสับเตอรต์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนสูงฟิล์มที่ได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าการสับเตอรต์ที่ความดันแก๊สต่ำกว่า

5.5 การอบ(anneal)ฟิล์มชนิดชั้นเดียว

นำฟิล์มที่ได้จากการสับเตอรต์ทั้งสามตัวอย่างมาตัดแบ่งเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1×5 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 5.9 ทำให้แต่ละตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 6 ชิ้นเนื่องจากความสมมาตร (symmetry) ทำให้ฟิล์มชั้นที่ 1 มีสมบัติเหมือนฟิล์มชั้นที่ 6 , ฟิล์มชั้นที่ 2 มีสมบัติเหมือนฟิล์มชั้นที่ 5 และฟิล์มชั้นที่ 3 มีสมบัติเหมือนฟิล์มชั้นที่ 4 ทำให้สามารถแบ่งฟิล์มที่ได้ออกเป็น 3 ชุดต่อหนึ่งตัวอย่างโดยที่แต่ละชุดมี 2 ชิ้น รวมทั้งสามตัวอย่างทำให้ฟิล์มชุดหนึ่งหนึ่งมี 6 ชิ้น ฟิล์มแต่ละชุดถูกแบ่งเป็นหนึ่งชิ้นที่ไม่ผ่านการอบและอีกห้าชิ้นนำไปอบที่อุณหภูมิต่างๆดังนี้ 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C เป็นเวลานาน 45 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางของสารประกอบคอปเปอร์อินเดียมแกเลียมไคซีลีไนด์(CIGS) และขณะที่สร้างฟิล์ม CIGS มีการให้ความร้อนแก่วัสดุรองรับ 500°C ซึ่งวัสดุรองรับคือฟิล์มบางโมลิบดีนัมบนกระจกโซดาไลม์ ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางโมลิบดีนัมจึงต้องคำนึงถึงผลจากความร้อนด้วย จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ทั้งหมดไปวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์ม และ ทดสอบสภาพการยึดติด

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

รูปที่ 5.9 ลักษณะของฟิล์มที่แบ่งได้เพื่อการอบ

5.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของฟิล์มชนิดชั้นเดียว

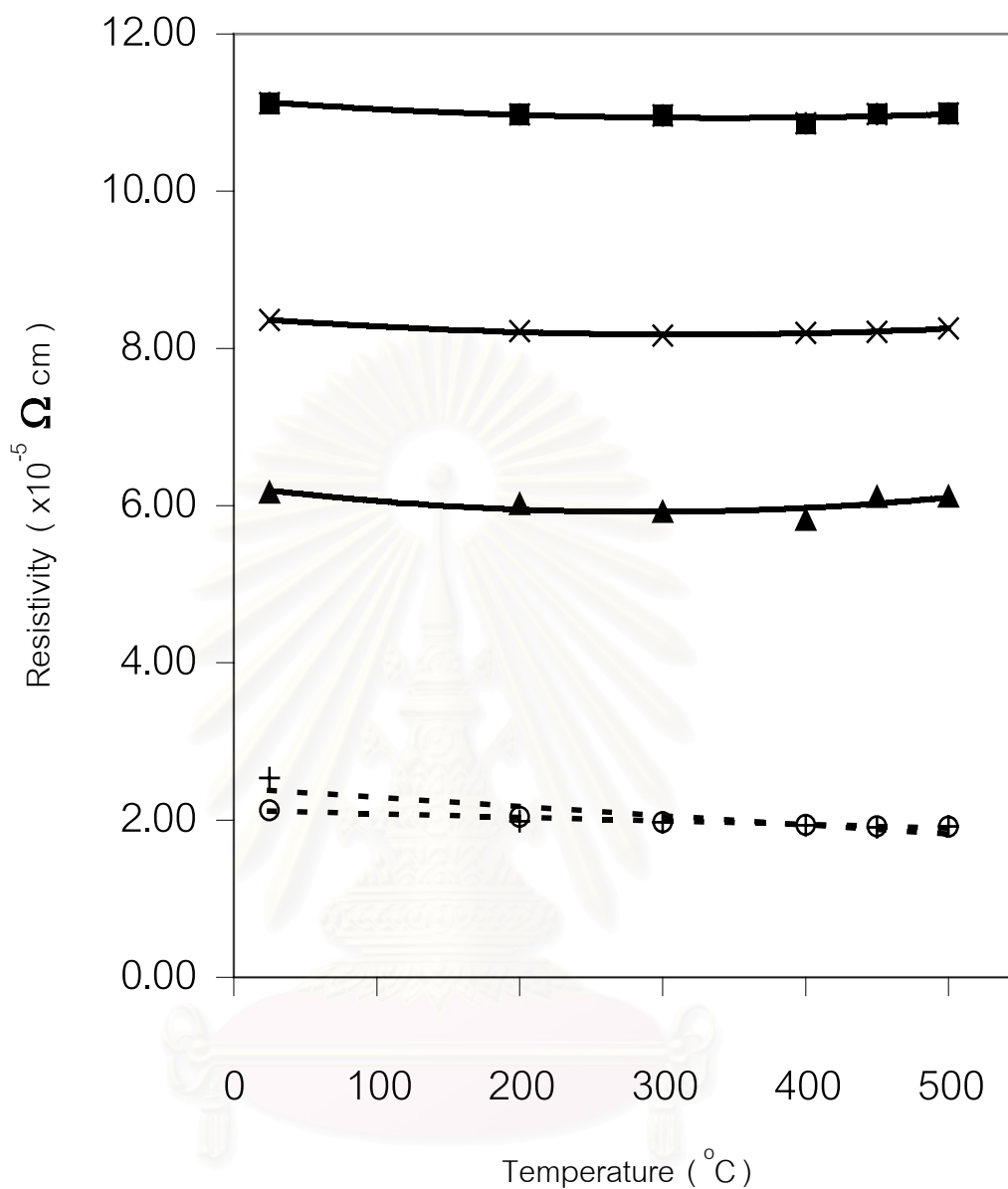
5.6.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า

ตารางที่ 5.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สับเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนค่าต่างๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงแต่ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนมีผลทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของอะตอมที่ช่วยลดขนาดของช่องว่างภายในฟิล์มลง จากตารางที่ 5.2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 5.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Annealing Temperature (°C)	Argon pressure (x 10 ⁻³ mbar)				
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
	Resistivity (x 10 ⁻⁵ Ω cm)				
25	2.12	2.53	6.17	8.36	11.12
200	2.04	1.99	6.02	8.22	10.98
300	1.97	1.97	5.92	8.16	10.96
400	1.94	1.93	5.82	8.20	10.87
450	1.92	1.91	6.11	8.21	10.98
500	1.92	1.92	6.12	8.25	10.99

ตารางที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของฟิล์มที่ความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ



รูปที่ 5.10 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ความดันแก๊สอาร์กอนต่างๆ

เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- o แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 4.0×10^{-3} mbar
- + แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 5.0×10^{-3} mbar
- ▲ แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 6.0×10^{-3} mbar
- x แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 7.0×10^{-3} mbar
- แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 8.0×10^{-3} mbar

5.6.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้าง(residual stress)ของฟิล์มสามารถคำนวณได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ความเค้นที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มเปลี่ยนไปมีผลให้มุม 2θ เลื่อนตำแหน่งไปจากกรณีที่ฟิล์มไม่เกิดความเค้นซึ่งมีค่ามุม 2θ เท่ากับ 40.516 องศาเป็นค่ามุม 2θ ของวัสดุกลุ่ม (bulk) ตารางที่ 5.3 ถึง 5.8 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทำให้สามารถทราบค่ามุม 2θ เพื่อไปคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบตามกฎของแบรกก์[23] และคำนวณค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์ม σ (GPa)ได้จากสมการ 4.8

set	T (°C)	2 θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.30	2.2361	-4.99
	200	40.32	2.2351	-4.51
	300	40.33	2.2345	-4.27
	400	40.34	2.2340	-4.03
	450	40.33	2.2345	-4.27
	500	40.30	2.2361	-4.99
2	25	40.32	2.2351	-4.51
	200	40.32	2.2351	-4.51
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.35	2.2335	-3.80
	450	40.35	2.2335	-3.80
	500	40.30	2.2361	-4.99
3	25	40.32	2.2351	-4.51
	200	40.35	2.2335	-3.80
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.35	2.2335	-3.80
	450	40.32	2.2351	-4.51
	500	40.32	2.2351	-4.51

ตารางที่ 5.3 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4.0×10^{-3} mbar

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.38	2.2319	-3.08
	300	40.40	2.2308	-2.61
	400	40.38	2.2319	-3.08
	450	40.38	2.2319	-3.08
	500	40.35	2.2335	-3.80
2	25	40.34	2.2340	-4.03
	200	40.38	2.2319	-3.08
	300	40.40	2.2308	-2.61
	400	40.41	2.2303	-2.37
	450	40.38	2.2319	-3.08
	500	40.36	2.2329	-3.56
3	25	40.34	2.2340	-4.03
	200	40.40	2.2308	-2.61
	300	40.41	2.2303	-2.37
	400	40.40	2.2308	-2.61
	450	40.38	2.2319	-3.08
	500	40.35	2.2335	-3.80

ตารางที่ 5.4 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีความดันแก๊ส
อาร์กอนเท่ากับ 5.0×10^{-3} mbar

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.42	2.2398	-2.14
	200	40.45	2.2282	-1.43
	300	40.45	2.2282	-1.43
	400	40.46	2.2277	-1.19
	450	40.43	2.2292	-1.90
	500	40.44	2.2287	-1.66
2	25	40.40	2.2308	-2.61
	200	40.41	2.2303	-2.37
	300	40.44	2.2287	-1.66
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.42	2.2398	-2.14
	500	40.44	2.2287	-1.66
3	25	40.44	2.2287	-1.66
	200	40.45	2.2282	-1.43
	300	40.46	2.2277	-1.19
	400	40.46	2.2277	-1.19
	450	40.45	2.2282	-1.43
	500	40.43	2.2292	-1.90

ตารางที่ 5.5 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่ความดันแก๊ส
อาร์กอนเท่ากับ 6.0×10^{-3} mbar

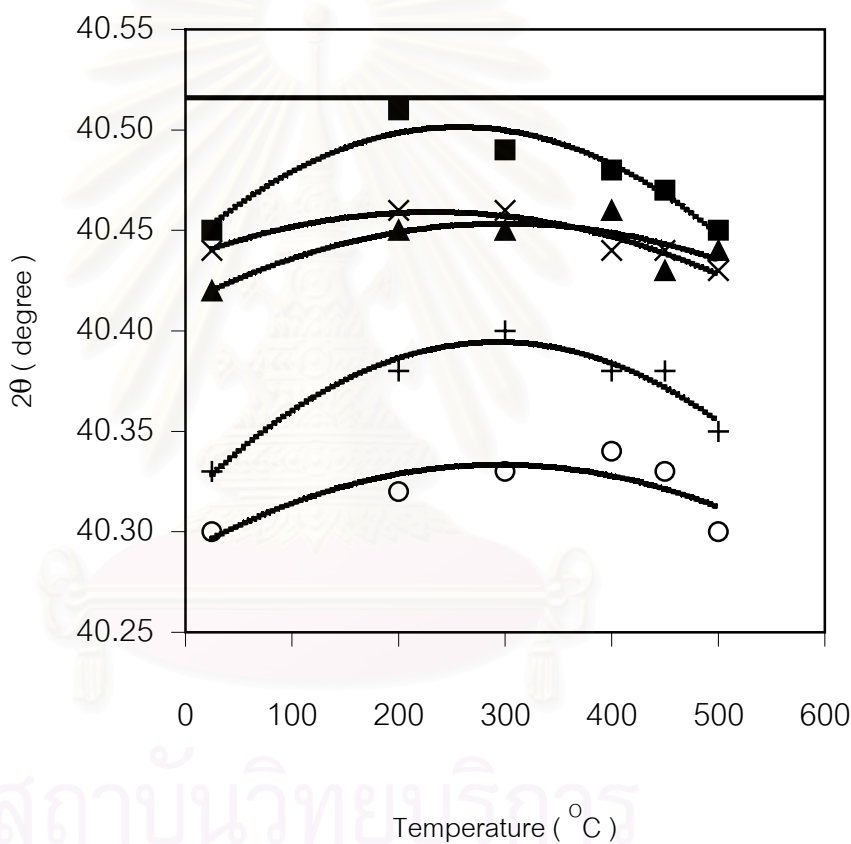
set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	room	40.44	2.2287	-1.66
	200	40.46	2.2277	-1.19
	300	40.46	2.2277	-1.19
	400	40.44	2.2287	-1.66
	450	40.44	2.2287	-1.66
	500	40.43	2.2292	-1.90
2	room	40.44	2.2287	-1.66
	200	40.45	2.2282	-1.43
	300	40.46	2.2277	-1.19
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.46	2.2277	-1.19
	500	40.44	2.2287	-1.66
3	room	40.45	2.2282	-1.43
	200	40.45	2.2282	-1.43
	300	40.46	2.2277	-1.19
	400	40.47	2.2271	-0.95
	450	40.46	2.2277	-1.19
	500	40.46	2.2277	-1.19

ตารางที่ 5.6 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีความดันแก๊ส
อาร์กอนเท่ากับ 7.0×10^{-3} mbar

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.45	2.2282	-1.43
	200	40.51	2.2250	-0.01
	300	40.49	2.2261	-0.48
	400	40.48	2.2266	-0.72
	450	40.47	2.2271	-0.95
	500	40.45	2.2282	-1.43
2	25	40.45	2.2282	-1.43
	200	40.48	2.2266	-0.72
	300	40.46	2.2277	-1.19
	400	40.46	2.2277	-1.19
	450	40.45	2.2282	-1.43
	500	40.44	2.2287	-1.66
3	25	40.46	2.2277	-1.19
	200	40.47	2.2271	-0.95
	300	40.51	2.2250	-0.01
	400	40.50	2.2255	-0.24
	450	40.50	2.2255	-0.24
	500	40.48	2.2266	-0.72

ตารางที่ 5.7 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีความดันแก๊ส
อาร์กอนเท่ากับ 8.0×10^{-3} mbar

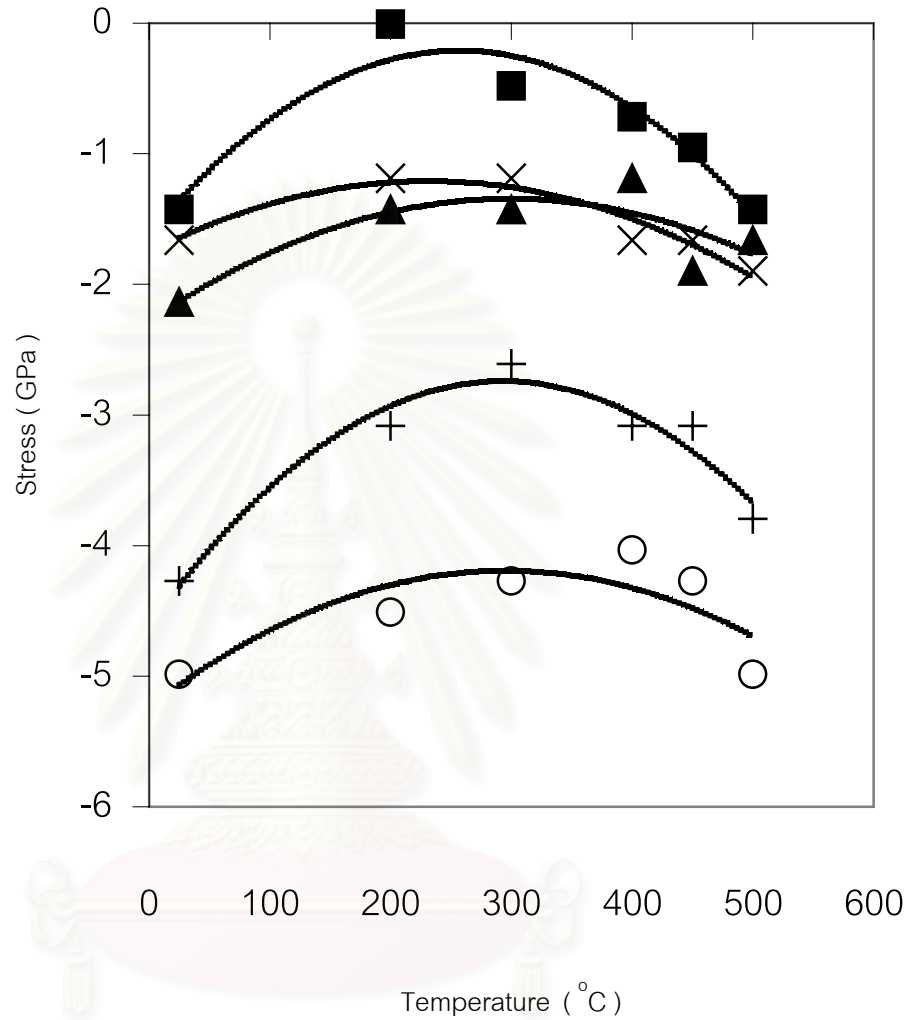
ตารางที่ 5.3 ถึง ตารางที่ 5.8 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และความเค้นตกค้างภายในฟิล์มที่คำนวณได้ พบว่าผลของความร้อนในช่วง 25 องศาเซลเซียสถึง 300 องศาเซลเซียส การเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ ห่างจากมุม 2θ เท่ากับ 40.516 ของกรณีที่ฟิล์มไม่มีความเค้นตกค้างมีค่าน้อยลง และในช่วง 300 องศาเซลเซียสถึง 500 องศาเซลเซียสการเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ ห่างจากมุม 2θ เท่ากับ 40.516 ของกรณีที่ฟิล์มไม่มีความเค้นตกค้างมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะผลของความเค้นตกค้างภายในฟิล์มโดยที่รูปที่ 5.11 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ เนื่องจากผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างภายในฟิล์มเทียบกับมุม 2θ เท่ากับ 40.516 องศาเมื่อฟิล์มไม่มีความเค้นตกค้างภายใน



รูปที่ 5.11 การเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ และเส้นตรงแสดงตำแหน่ง $2\theta = 40.516$ องศา เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

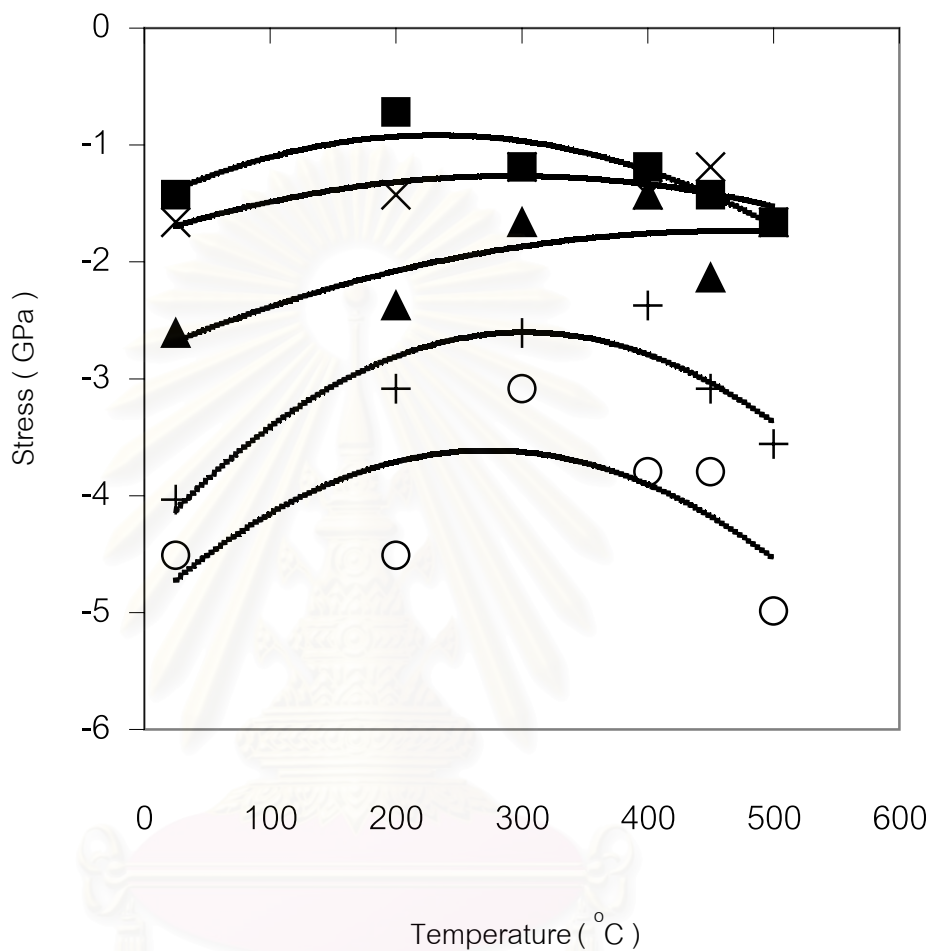
- o แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 4.0×10^{-3} mbar
- + แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 5.0×10^{-3} mbar
- ▲ แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 6.0×10^{-3} mbar
- x แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 7.0×10^{-3} mbar
- แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 8.0×10^{-3} mbar

รูปที่ 5.12 ถึง 5.14 แสดงผลเนื่องจากตารางที่ 5.3 ถึง 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเค้นตกค้างภายในฟิล์มเนื่องจากผลของอุณหภูมิ



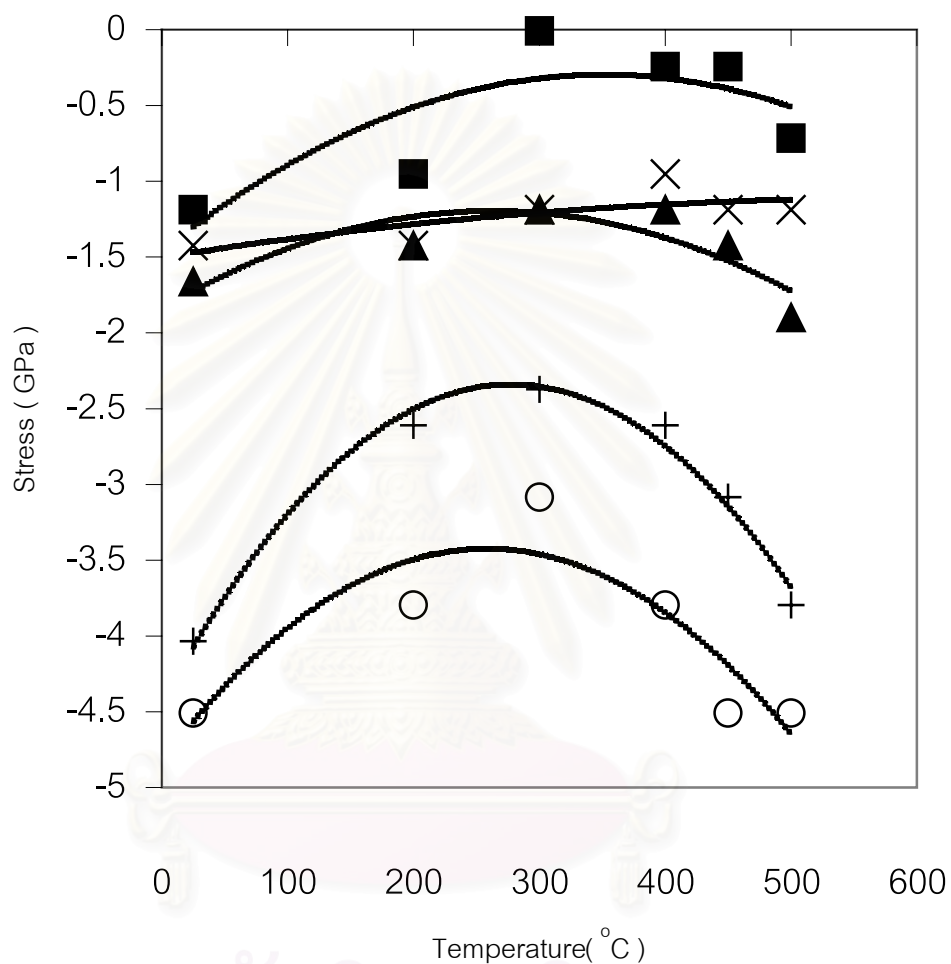
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบาง โมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 1 เส้นประในรูปแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- แทนความดันแก๊สออกซิเจนที่ 4.0×10^{-3} mbar
- + แทนความดันแก๊สออกซิเจนที่ 5.0×10^{-3} mbar
- ▲ แทนความดันแก๊สออกซิเจนที่ 6.0×10^{-3} mbar
- × แทนความดันแก๊สออกซิเจนที่ 7.0×10^{-3} mbar
- แทนความดันแก๊สออกซิเจนที่ 8.0×10^{-3} mbar



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบาง โมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 2 เส้นประในรูปแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- o แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 4.0×10^{-3} mbar
- + แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 5.0×10^{-3} mbar
- ▲ แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 6.0×10^{-3} mbar
- x แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 7.0×10^{-3} mbar
- แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 8.0×10^{-3} mbar



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบาง โมลิบดีนัมของชุดการทดลองที่ 3 เส้นประในรูปแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 4.0×10^{-3} mbar
- + แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 5.0×10^{-3} mbar
- ▲ แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 6.0×10^{-3} mbar
- x แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 7.0×10^{-3} mbar
- แทนความดันแก๊สอาร์กอนที่ 8.0×10^{-3} mbar

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 5.5 ถึง 5.8 และ รูปที่ 5.11 ถึง 5.14 เป็นผลเนื่องจากการมีความเค้นตกค้างภายในฟิล์ม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลของการสปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนที่ต่างกันที่ทำให้ฟิล์มเกิดช่องว่างขึ้นและช่องว่างที่เกิดขึ้นมากเมื่อสปีดเตอร์ที่ความดันแก๊สอาร์กอนสูงมีผลทำให้อะตอมไม่เรียงตัวอัดแน่นมาก ฟิล์มมีการคลายตัวมากขึ้นจึงทำให้การสปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนสูงฟิล์มมีความเค้นตกค้างภายในต่ำกว่าการ สปีดเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนต่ำ[24,25,26]

ลักษณะการเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามรูปที่ 5.11 และผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มตามรูปที่ 5.12 ถึง 5.14 สามารถอธิบายได้ว่าผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 300 องศาเซลเซียส กระจกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมากกว่าดังนั้นกระจกจึงยืดตัวออกและออกแรงดึงฟิล์มให้ฟิล์มยืดตัวออกตาม ทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มลดลงโดยฟิล์มพยายามผ่อนคลายตัวเองในทิศทางที่จะลดความเค้นภายในฟิล์มลงทำให้ช่วงนี้ฟิล์มมีความเค้นลดลง แต่เมื่อถึงอุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของกระจกทำให้กระจกยืดตัวออกมากและฟิล์มก็ถูกยืดตัวออกมากเช่นเดียวกัน แต่เมื่อฟิล์มและกระจกกลับสู่อุณหภูมิห้องเกิดการหดตัวกลับอย่างรวดเร็วทำให้ฟิล์มถูกอัดมีผลให้ค่าระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้นดังนั้นความเค้นตกค้างภายในของฟิล์มที่คำนวณได้ในช่วงอุณหภูมินี้จึงเพิ่มขึ้น

5.6.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการยึดติด

ภายหลังการอบฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆนำฟิล์มมาทดสอบสภาพการยึดติดโดยวิธี pull-off ค่าแรงที่ได้จากการดึงฟิล์มจนหลุดแสดงถึงสภาพการยึดติดของฟิล์ม

ตารางที่ 5.8 แสดงแรงที่ใช้ดึงฟิล์มจนหลุดโดยที่แรงดึงสูงสุดที่เครื่องมือสามารถออกแรงได้มีค่าเท่ากับ 3447 kPa ในกรณีที่ไม่สามารถดึงฟิล์มให้หลุดได้แสดงด้วยค่า >3447 kPa อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ฟิล์มเกิดการคลายตัวความเค้นตกค้างภายในฟิล์มลดลงทำให้ที่อุณหภูมิสูงออกแรงดึงฟิล์มมากขึ้น แต่ผลของอุณหภูมิต่างๆไม่เด่นชัดเท่ากับผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสปีดเตอร์ ความดันแก๊สอาร์กอนสูงฟิล์มเกิดช่องว่างภายในมากทำให้ฟิล์มมีความเค้นลดลง

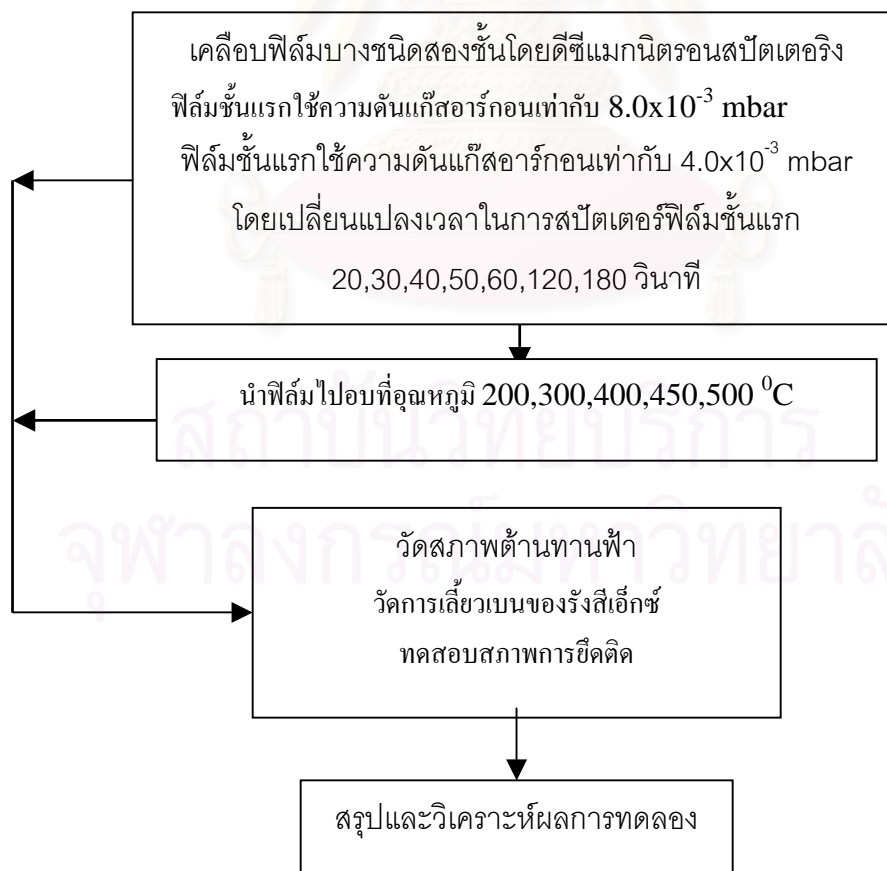
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดันแก๊สอาร์กอน ($\times 10^{-3}$ mbar)				
		4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
		แรงที่ใช้ดึงฟิล์ม (kPa)				
การ ทดลอง ชุดที่ 1	25	1765	2337	2854	3082	>3447
	200	1944	2282	2909	3219	>3447
	300	205	2337	2854	3309	>3447
	400	2171	2399	2909	3447	>3447
	450	2227	2564	2971	3364	>3447
	500	2282	2509	3026	>3447	>3447
การ ทดลอง ชุดที่ 2	25	1882	2337	2744	3082	>3447
	200	1999	2282	2909	>3447	>3447
	300	2109	2399	2854	3219	>3447
	400	2171	2454	2971	3364	>3447
	450	2227	2399	2909	>3447	>3447
	500	2282	2509	3029	>3447	>3447
การ ทดลอง ชุดที่ 3	25	1765	2282	2744	3219	>3447
	200	1944	2227	2799	3364	>3447
	300	2054	2337	2909	3309	>3447
	400	2171	2282	2971	3309	>3447
	450	2227	2337	2909	>3447	>3447
	500	2171	2454	2971	>3447	>3447

ตารางที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มกับความดันแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากตารางที่ 5.8 อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้สภาพการยึดติดของฟิล์มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับผลของความดันแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในการสเปคเตอร์ ความดันแก๊สอาร์กอนสูงฟิล์มมีความเค้นตึงภายในต่ำเนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นมากมีผลทำให้ฟิล์มมีสภาพการยึดติดสูง เมื่อสเปคเตอร์ที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8.0×10^{-3} mbar ฟิล์มมีสภาพการยึดติดสูงมากจนไม่สามารถดึงให้ฟิล์มหลุดออกจากกระจกได้

5.7 ฟิล์มชนิดสองชั้น

จากผลการทดลองของฟิล์มชนิดชั้นเดียวความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8.0×10^{-3} mbar เหมาะสมกับใช้ในการสเปคเตอร์ฟิล์มชั้นแรกเพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีสภาพการยึดติดสูงแต่ใช้ฟิล์มเพียงบางๆเพราะที่ความดันแก๊สระดับนี้ทำให้ฟิล์มมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง และสเปคเตอร์ต่อไปจนได้ฟิล์มหนา $2,500 \text{ \AA}$ ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4.0×10^{-3} mbar เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ การทดลองศึกษาความหนาที่เหมาะสมสำหรับฟิล์มชั้นแรกและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มเช่นเดียวกับฟิล์มชนิดชั้นเดียว



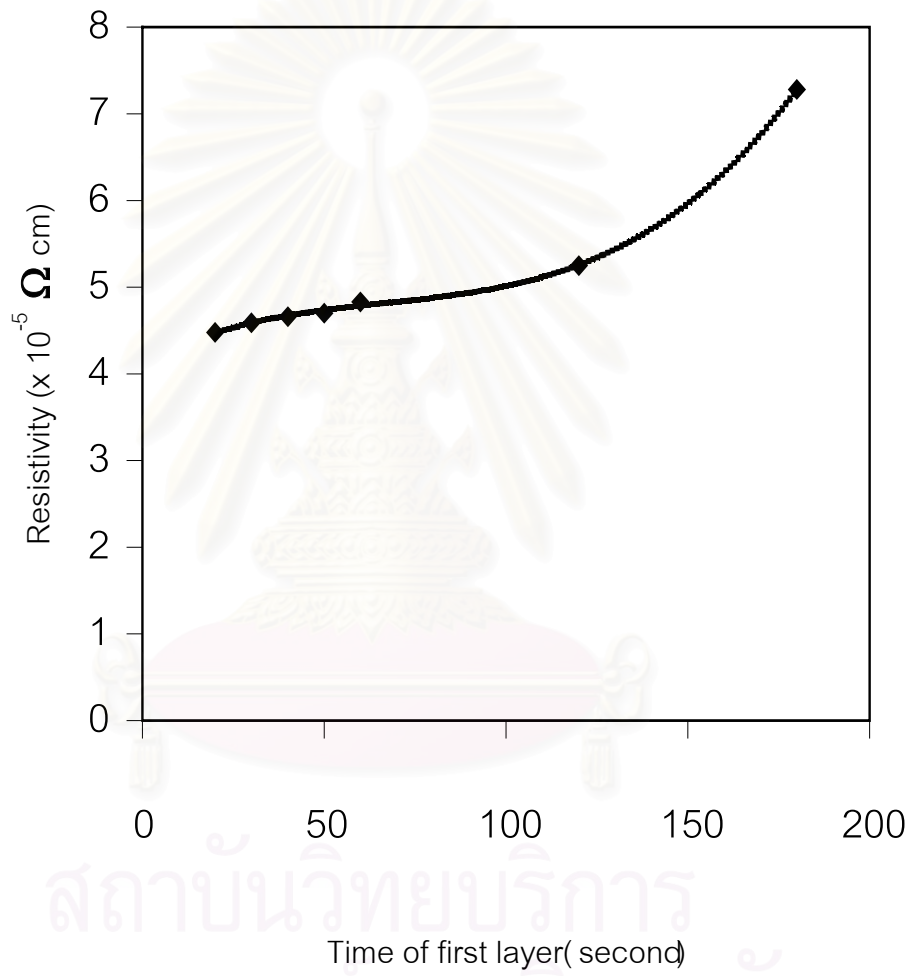
รูปที่ 5.15 ขั้นตอนงานวิจัยฟิล์มชนิดสองชั้น

5.8 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดสองชั้น

จากการทดลองวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางชนิดสองชั้นแสดงตามตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.16 เมื่อความหนาของฟิล์มชั้นแรกเพิ่มขึ้นทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูงขึ้นเพราะลักษณะของการเพิ่มความหนาของฟิล์มชั้นแรกเป็นการแทนที่ความหนาของฟิล์มชั้นที่สองการซึ่งฟิล์มชั้นแรกสปีเตอร์ที่ความดันแก๊สอาร์กอน 8.0×10^{-3} mbar ทำให้ฟิล์มเกิดช่องว่างภายในมากขึ้นและเพิ่มมากขึ้นตามความหนาที่มากขึ้นทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูงขึ้นตามความหนาของฟิล์มชั้นแรก

Time of first layer (second)	Average resistivity ($\times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$)	Standard deviation ($\times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$)
20	4.48	0.51
30	4.59	0.57
40	4.66	0.65
50	4.70	0.75
60	4.83	0.69
120	5.25	0.77
180	7.28	1.31

ตารางที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์มชั้นแรกตามเวลาที่ใช้ในการสปีเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอิร์

พจนานุกรมศัพท์ เทคโนโลยีและพลังงานแบบบูรณาการ

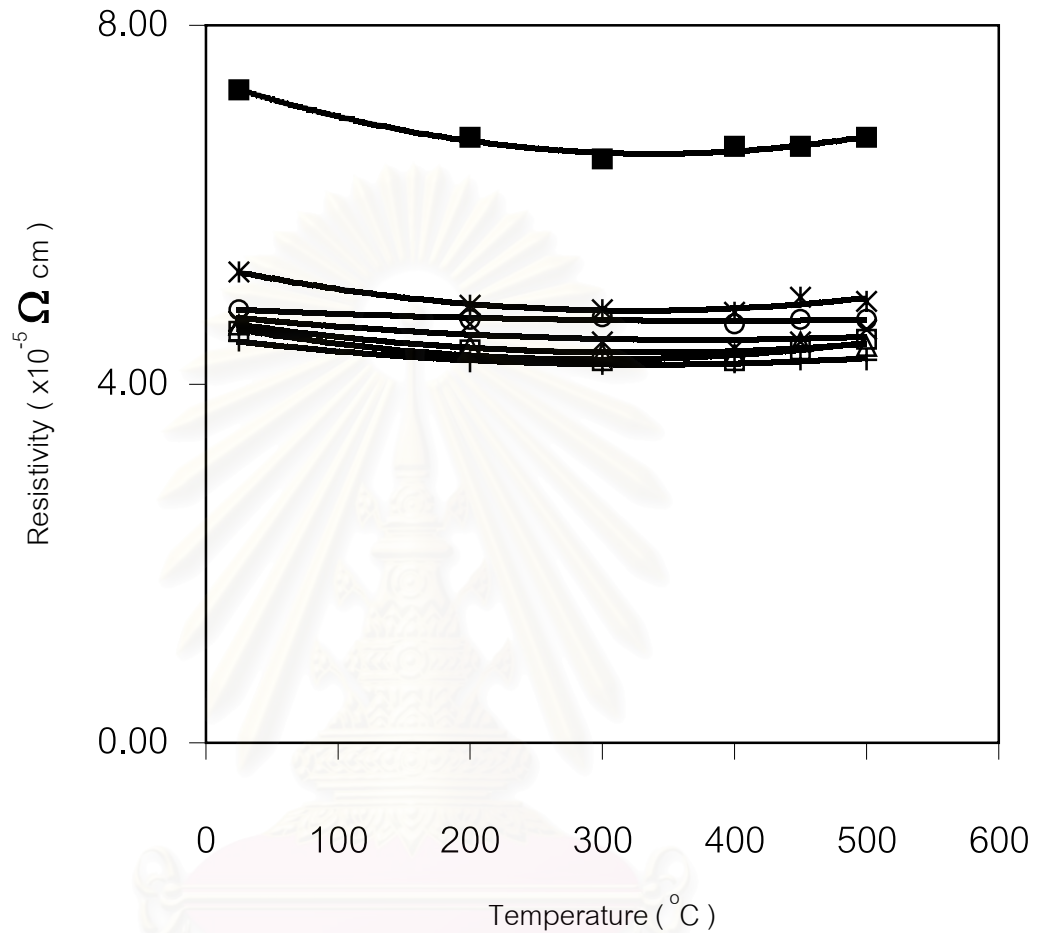
5.9 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของฟิล์มชนิดสองชั้น

5.9.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้า

Annealing temperature (°C)	Time of first layer (second)						
	20	30	40	50	60	120	180
	Resistivity ($\times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$)						
25	4.48	4.59	4.66	4.70	4.83	5.25	7.28
200	4.25	4.38	4.42	4.67	4.72	4.88	6.75
300	4.22	4.26	4.34	4.47	4.75	4.83	6.51
400	4.24	4.26	4.33	4.40	4.67	4.80	6.65
450	4.27	4.31	4.37	4.47	4.72	4.95	6.65
500	4.27	4.35	4.42	4.51	4.72	4.92	6.60

ตารางที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการสัปดาห์

ตารางที่ 5.10 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางชนิดสองชั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีแนวโน้มลดลงแต่ลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อนช่วยให้อะตอมเรียงตัวได้ดีขึ้นเช่นเดียวกับฟิล์มบางชนิดชั้นเดียว จากตารางที่ 5.10 สามารถแสดงผลของอุณหภูมิต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดสองชั้นตามรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดสองชั้น
เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- + แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 20 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 30 วินาที
- Δ แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 40 วินาที
- x แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 50 วินาที
- o แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 60 วินาที
- * แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 120 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 180 วินาที

5.9.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้นสามารถคำนวณได้จากวิธีการเดียวกับการหาความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดชั้นเดียวคือการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การเปลี่ยนแปลงความเค้นเนื่องจากความร้อนมีผลให้ระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มเปลี่ยนแปลงทำให้มุม 2θ เลื่อนตำแหน่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ตารางที่ 5.11 ถึง 5.17 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้น

set	T (°C)	2θ (degree)	d_n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.35	2.2335	-3.80
	300	40.35	2.2335	-3.80
	400	40.36	2.2329	-3.56
	450	40.32	2.2351	-4.51
	500	40.32	2.2351	-4.51
2	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.35	2.2335	-3.80
	300	40.36	2.2329	-3.56
	400	40.36	2.2329	-3.56
	450	40.35	2.2335	-3.80
	500	40.33	2.2345	-4.27
3	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.35	2.2335	-3.80
	300	40.36	2.2329	-3.56
	400	40.36	2.2329	-3.56
	450	40.35	2.2335	-3.80
	500	40.34	2.2340	-4.03

ตารางที่ 5.11 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 20 วินาที

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.36	2.2329	-3.56
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.36	2.2329	-3.56
	450	40.36	2.2329	-3.56
	500	40.35	2.2335	-3.80
2	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.36	2.2329	-3.56
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.38	2.2319	-3.08
	450	40.36	2.2329	-3.56
	500	40.35	2.2335	-3.80
3	25	40.33	2.2345	-4.27
	200	40.335	2.2343	-4.15
	300	40.36	2.2329	-3.56
	400	40.35	2.2335	-3.80
	450	40.35	2.2335	-3.80
	500	40.34	2.2340	-4.03

ตารางที่ 5.12 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 30 วินาที

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.35	2.2335	-3.80
	200	40.36	2.2329	-3.56
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.38	2.2319	-3.08
	450	40.36	2.2329	-3.56
	500	40.36	2.2329	-3.56
2	25	40.35	2.2335	-3.80
	200	40.36	2.2329	-3.56
	300	40.38	2.2319	-3.08
	400	40.38	2.2319	-3.08
	450	40.38	2.2319	-3.08
	500	40.36	2.2329	-3.56
3	25	40.35	2.2335	-3.80
	200	40.36	2.2329	-3.56
	300	40.40	2.2308	-2.61
	400	40.38	2.2319	-3.08
	450	40.38	2.2319	-3.08
	500	40.36	2.2329	-3.56

ตารางที่ 5.13 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 40 วินาที

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.38	2.2319	-3.08
	200	40.40	2.2308	-2.61
	300	40.40	2.2308	-2.61
	400	40.41	2.2303	-2.37
	450	40.40	2.2308	-2.61
	500	40.38	2.2319	-3.08
2	25	40.38	2.2319	-3.08
	200	40.40	2.2308	-2.61
	300	40.41	2.2303	-2.37
	400	40.41	2.2303	-2.37
	450	40.40	2.2308	-2.61
	500	40.40	2.2308	-2.61
3	25	40.38	2.2319	-3.08
	200	40.38	2.2319	-3.08
	300	40.40	2.2308	-2.61
	400	40.41	2.2303	-2.37
	450	40.40	2.2308	-2.61
	500	40.38	2.2319	-3.08

ตารางที่ 5.14 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสปัตเตอร์นาน 50 วินาที

set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.40	2.2308	-2.61
	200	40.41	2.2303	-2.37
	300	40.42	2.2298	-2.14
	400	40.42	2.2298	-2.14
	450	40.41	2.2303	-2.37
	500	40.41	2.2303	-2.37
2	25	40.41	2.2303	-2.37
	200	40.42	2.2298	-2.14
	300	40.43	2.2292	-1.90
	400	40.42	2.2298	-2.14
	450	40.41	2.2303	-2.37
	500	40.40	2.2308	-2.61
3	25	40.40	2.2308	-2.61
	200	40.42	2.2298	-2.14
	300	40.43	2.2292	-1.90
	400	40.42	2.2298	-2.14
	450	40.42	2.2298	-2.14
	500	40.41	2.2303	-2.37

ตารางที่ 5.15 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 60 วินาที

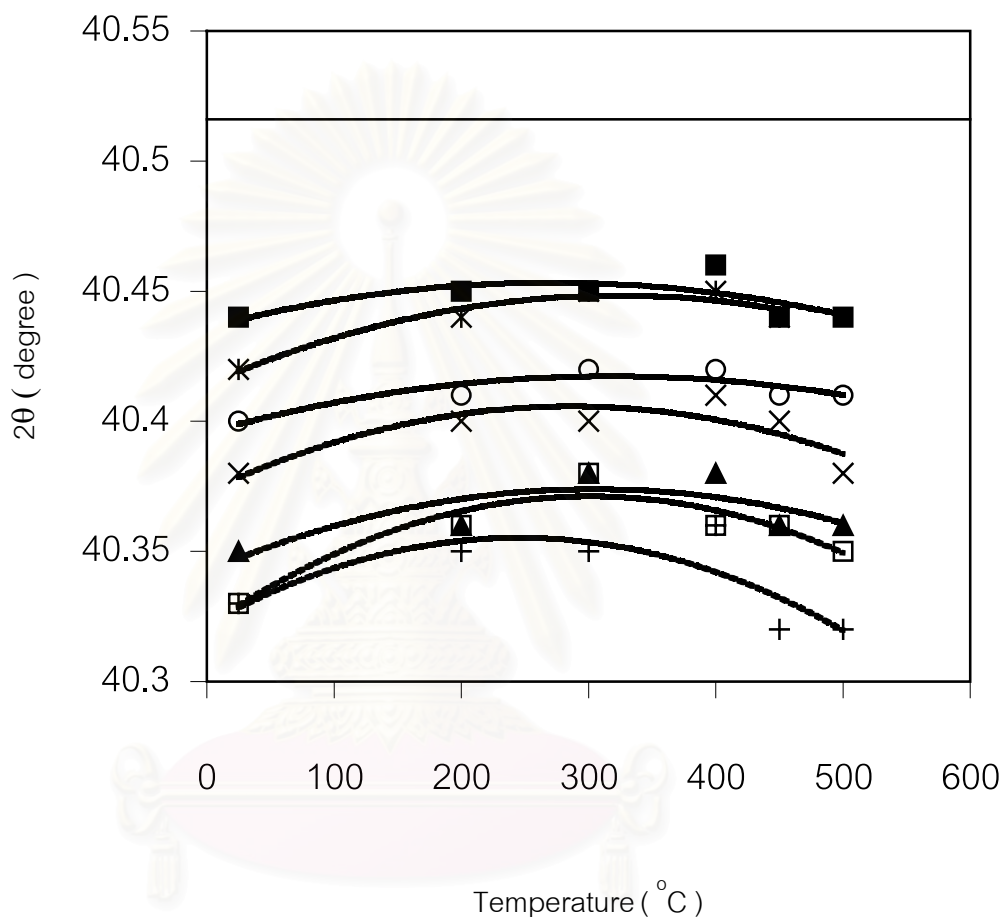
set	T (°C)	2θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.42	2.2298	-2.14
	200	40.44	2.2287	-1.66
	300	40.45	2.2282	-1.43
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.44	2.2287	-1.66
	500	40.44	2.2287	-1.66
2	25	40.42	2.2298	-2.14
	200	40.44	2.2287	-1.66
	300	40.44	2.2287	-1.66
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.45	2.2282	-1.43
	500	40.44	2.2287	-1.66
3	25	40.42	2.2298	-2.14
	200	40.43	2.2292	-1.90
	300	40.44	2.2287	-1.66
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.43	2.2292	-1.90
	500	40.43	2.2292	-1.90

ตารางที่ 5.16 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์ 120 วินาที

set	T (°C)	2 θ (degree)	d _n (Å)	σ (GPa)
1	25	40.44	2.2287	-1.66
	200	40.45	2.2282	-1.43
	300	40.45	2.2282	-1.43
	400	40.46	2.2277	-1.19
	450	40.44	2.2287	-1.66
	500	40.44	2.2287	-1.66
2	25	40.44	2.2287	-1.66
	200	40.44	2.2287	-1.66
	300	40.45	2.2282	-1.43
	400	40.45	2.2282	-1.43
	450	40.44	2.2287	-1.66
	500	40.43	2.2292	-1.90
3	25	40.46	2.2277	-1.19
	200	40.44	2.2287	-1.66
	300	40.45	2.2282	-1.43
	400	40.46	2.2277	-1.19
	450	40.46	2.2277	-1.19
	500	40.44	2.2287	-1.66

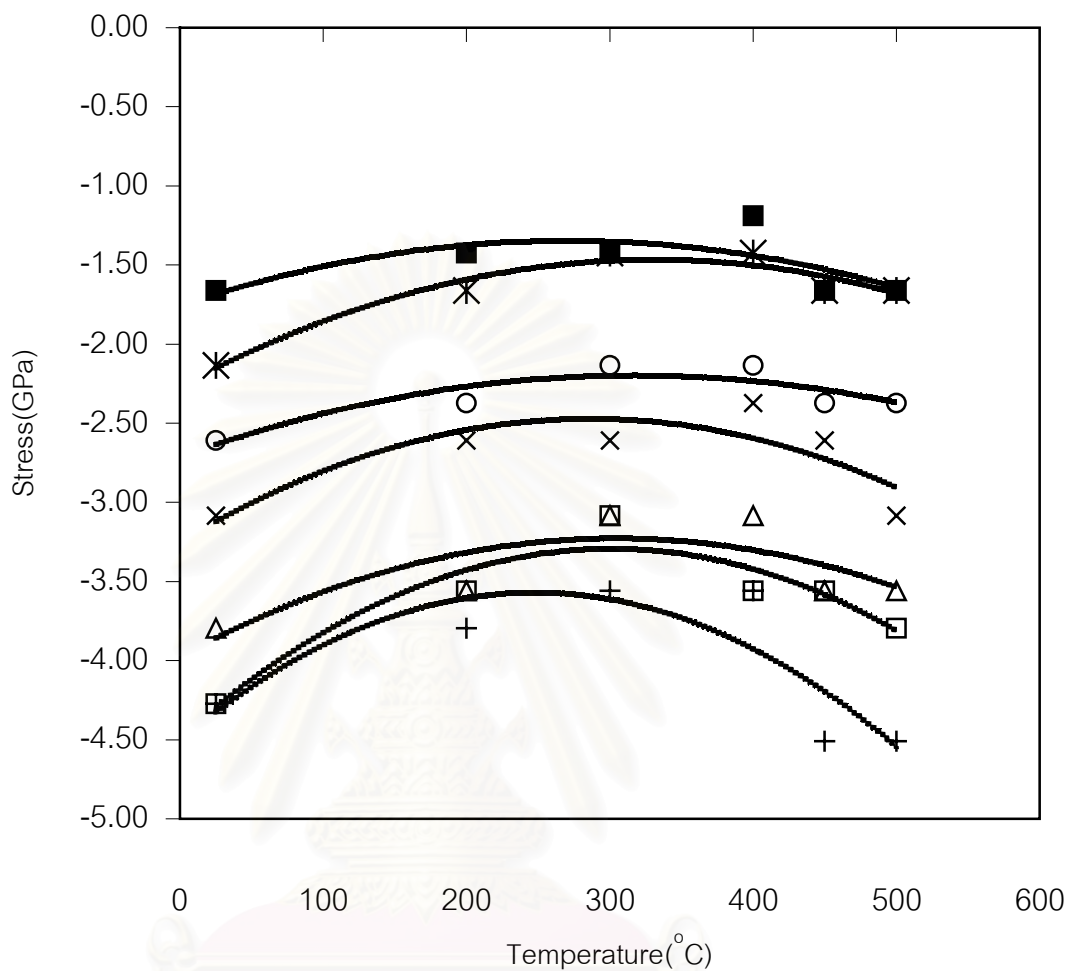
ตารางที่ 5.17 ความเค้นตกค้างภายในฟิล์มบางโมลิบดีนัมชนิดสองชั้นที่
ความหนาฟิล์มชั้นที่หนึ่งใช้เวลาสัปดาห์เตอร์นาน 180 วินาที

รูปที่ 5.18 แสดงผลจากตารางที่ 5.11 ถึง 5.17 ซึ่งแสดงการเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ เนื่องจากผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้นเทียบกับมุม 2θ เท่ากับ 40.516 องศาเมื่อฟิล์มไม่มีความเค้นตกค้างภายในแทนด้วยเส้นตรงในรูป



รูปที่ 5.18 การเลื่อนตำแหน่งของมุม 2θ ของฟิล์มชนิดสองชั้น และเส้นตรงแสดงตำแหน่ง $2\theta = 40.516$ องศา เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

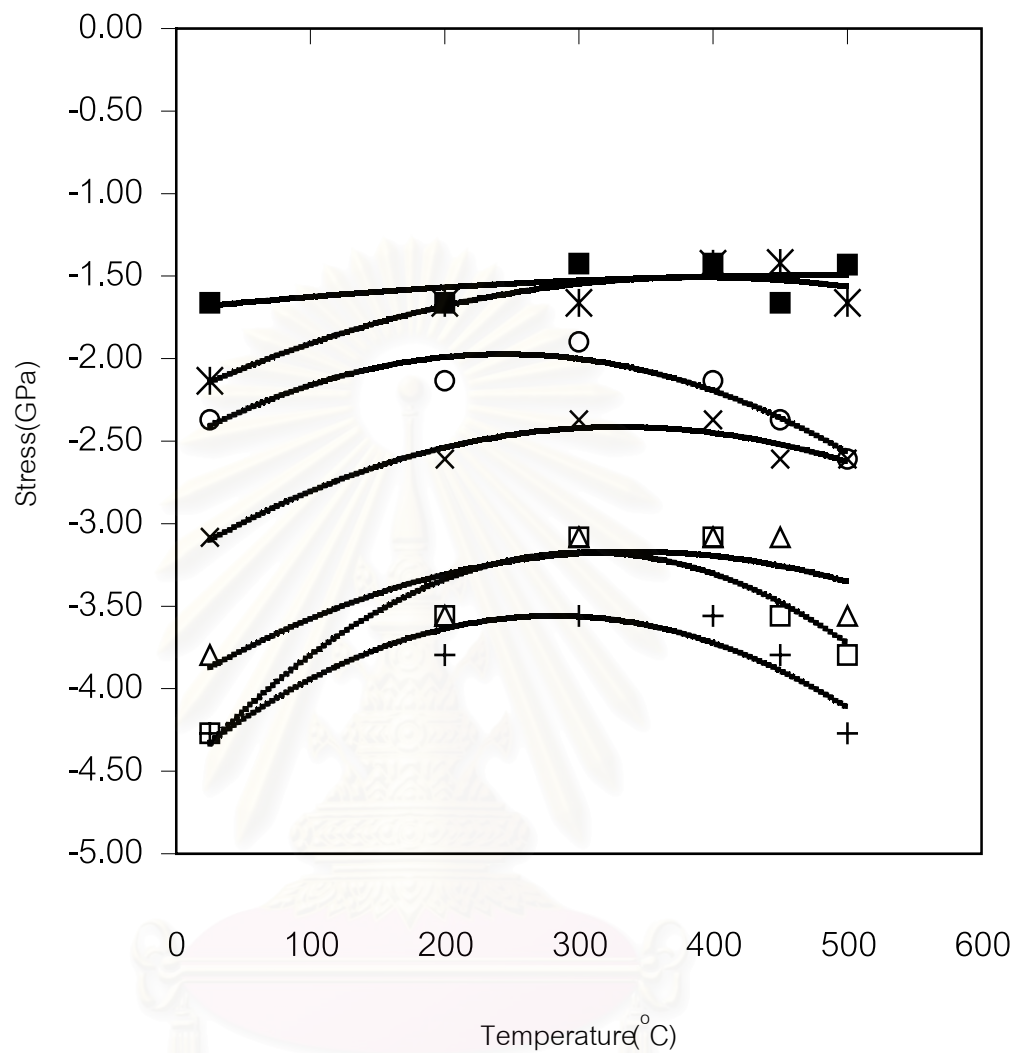
- + แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 20 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 30 วินาที
- Δ แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 40 วินาที
- x แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 50 วินาที
- o แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 60 วินาที
- * แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 120 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 180 วินาที



รูปที่ 5.19 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตึงภายในฟิล์มชนิดสองชั้น

ของการทดลองชุดที่ 1 เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

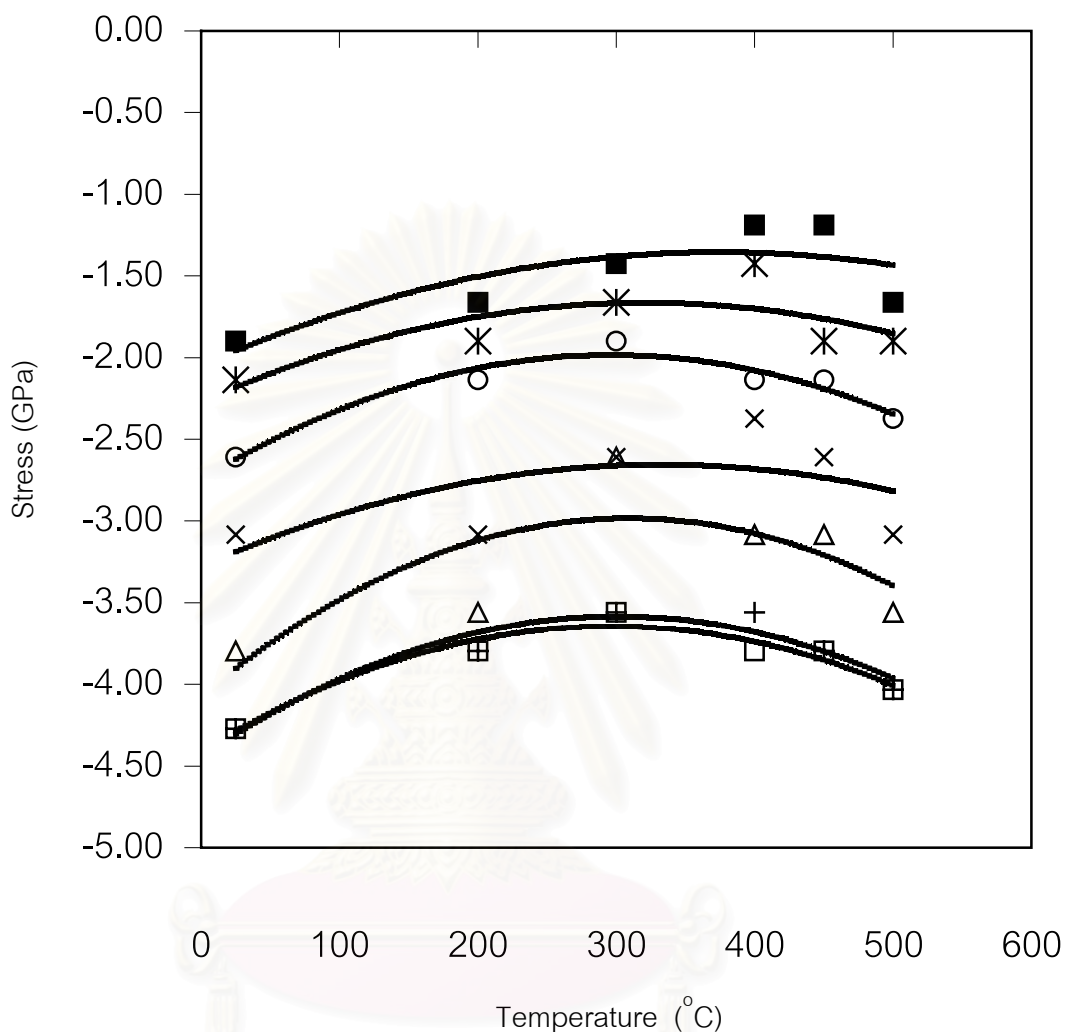
- + แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 20 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 30 วินาที
- Δ แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 40 วินาที
- x แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 50 วินาที
- o แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 60 วินาที
- * แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 120 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสputเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 180 วินาที



รูปที่ 5.20 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้น

ของการทดลองชุดที่ 2 เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- + แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 20 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 30 วินาที
- △ แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 40 วินาที
- x แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 50 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 60 วินาที
- * แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 120 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสปัตเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนาน 180 วินาที



รูปที่ 5.21 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเค้นตกค้างภายในฟิล์มชนิดสองชั้น

ของการทดลองชุดที่ 3 เส้นประแสดงแนวโน้มของข้อมูล

- + แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 20 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 30 วินาที
- △ แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 40 วินาที
- x แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 50 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 60 วินาที
- * แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 120 วินาที
- แทน เวลาที่ใช้ในการสเปคโตรฟิล์มชั้นแรกนาน 180 วินาที

รูปที่ 5.19 – 5.21 แสดงผลจากตารางที่ 5.11-5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับความเค้นตกค้างภายในฟิล์ม การแบ่งฟิล์มออกเป็นสองชั้นโดยฟิล์มชั้นแรกใช้ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8×10^{-3} mbar ช่วยลดความเค้นตกค้างภายในของฟิล์มลงเพราะมีช่องว่างเกิดในฟิล์มมากขึ้นทำให้อะตอมไม่เรียงตัวอัดกันแน่น

ลักษณะของผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25 – 300 องศาเซลเซียส กระจกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมากกว่า ดังนั้นกระจกจึงยืดตัวออกและออกแรงดึงฟิล์มให้ฟิล์มยืดตัวออกตาม ทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบของฟิล์มลดลงโดยฟิล์มพยายามผ่อนคลายตัวเองในทิศทางที่จะลดความเค้นภายในฟิล์มลงทำให้ช่วงนี้ฟิล์มมีความเค้นลดลง แต่เมื่อถึงอุณหภูมิในช่วง 300 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของกระจก ทำให้กระจกยืดตัวออกมากและฟิล์มก็ถูกยืดตัวออกมากเช่นเดียวกัน แต่เมื่อฟิล์มและกระจกกลับสู่อุณหภูมิจึงเกิดการหดตัวกลับอย่างรวดเร็วทำให้ฟิล์มถูกอัดมีผลให้ค่าระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้นดังนั้นความเค้นตกค้างภายในของฟิล์มที่คำนวณได้ในช่วงอุณหภูมินี้จึงเพิ่มขึ้นโดยที่ผลการทดลองของฟิล์มชนิดสองชั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์มบางชนิดชั้นเดียว

5.9.3 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการยึดติดของฟิล์มชนิดสองชั้น

ภายหลังการอบฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆนำฟิล์มมาทดสอบสภาพการยึดติดโดยวิธี pull-off ค่าแรงที่อ่านได้จากการดึง load หมายถึงสภาพการยึดติดของฟิล์ม ผลการทดสอบสภาพการยึดติดแสดงดังตารางที่ 5.18

เมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มชั้นแรกมากขึ้นทำให้ฟิล์มมีสภาพการยึดติดสูงจนกระทั่งไม่สามารถดึงให้หลุดได้เมื่อใช้เวลาสเปคเตอร์ฟิล์มชั้นแรกนานตั้งแต่ 50 วินาทีขึ้นไปเพราะเมื่อความหนาของฟิล์มมากขึ้นมีช่องว่างภายในฟิล์มมากขึ้นด้วย เนื่องจากที่ความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 8.0×10^{-3} mbar อะตอมมีการชนกันมากทำให้ตกกระทบเป็นมุมเอียงบนกระจกเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นเป็นตัวช่วยลดความเค้นภายในฟิล์ม

	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาของฟิล์มชั้นแรกตามเวลาที่ใช้ในการสเป็คเตอร์ (วินาที)						
		20	30	40	50	60	120	180
		แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์ม (kPa)						
การ ทดลอง ชุดที่ 1	25	3026	3144	3309	>3447	>3447	>3447	>3447
	200	3026	3144	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
	300	3144	3219	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	400	3144	3261	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	450	3082	3219	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	500	3082	3261	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
การ ทดลอง ชุดที่ 2	25	3026	3144	3309	>3447	>3447	>3447	>3447
	200	3026	3219	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
	300	3082	3219	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	400	3144	3261	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	450	3144	3261	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
	500	3082	3309	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
การ ทดลอง ชุดที่ 3	25	3026	3144	3309	>3447	>3447	>3447	>3447
	200	3082	3261	3364	>3447	>3447	>3447	>3447
	300	3144	3309	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	400	3144	3261	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	450	3144	3219	>3447	>3447	>3447	>3447	>3447
	500	3082	3261	3364	>3447	>3447	>3447	>3447

ตารางที่ 5.18 แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มชนิดสองชั้นให้หลุดออกจากกระจกโซดาไลม์

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างฟิล์มชนิดชั้นเดียวและฟิล์มชนิดสองชั้นพบว่าฟิล์มชนิดสองชั้นมีความเค้นตกค้างภายในฟิล์มต่ำและมีสภาพการยึดติดสูงแต่สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดของฟิล์มชนิดสองชั้นเท่ากับ $4.48 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ และสภาพการยึดติดสูงเท่ากับ 3026 kPa ที่อุณหภูมิห้องเมื่อสเปคเตอร์ฟิล์มชั้นแรกที่มีความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ $8 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ เป็นเวลานาน 20 วินาที สำหรับฟิล์มชนิดชั้นเดียวพบว่ามีความเค้นตกค้างภายในสูงกว่าและมีค่าสภาพการยึดติดน้อยกว่าฟิล์มชนิดสองชั้น แต่เมื่อพิจารณาการสเปคเตอร์ที่มีความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำเท่ากับ $2.53 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ และสภาพการยึดติดเท่ากับ 2337 kPa ที่อุณหภูมิห้อง จากงานวิจัยที่ผ่านมาของห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำพบว่าฟิล์มควรมีสภาพการยึดติดตั้งแต่ 2068 kPa[27] ขึ้นไปที่สูงมากพอที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและทางเคมีจนเสร็จขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS และสามารถนำเซลล์ไปใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งเมื่อเทียบกับการสเปคเตอร์ที่มีความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ $4 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดเท่ากับ $2.12 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ แต่มีค่าสภาพการยึดติดน้อยที่สุดเท่ากับ 1765 kPa ที่อุณหภูมิห้อง และการสเปคเตอร์ที่มีความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ $6 \times 10^{-3} \text{ mbar}$ ฟิล์มมีค่าสภาพการยึดติดสูงเท่ากับ 2854 kPa ที่อุณหภูมิห้องแต่ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงถึง $6.18 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสเปคเตอร์ฟิล์มบางโมลิบดีนัมเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ CIGS คือการสเปคเตอร์ฟิล์มที่มีความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ $5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$

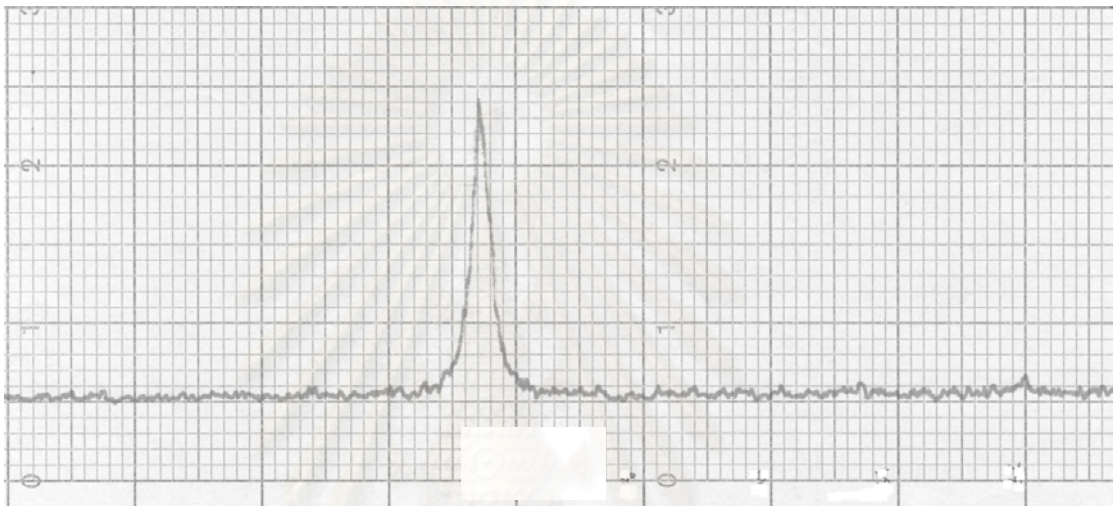
รายการอ้างอิง

1. Rockett, A., and Birkmire, R.W. CuInSe_2 for photovoltaic application. J. Appl. Phys. 70 (October 1991) : R81.
2. Stolt, L., and Hedstrom, J. ZnO/CdS/CuInSe_2 thin film solar cells with improved performance. Appl. Phys. Lett. 62(February 1993) : 597.
3. Blachman, A.G. Stress and resistivity control in sputtered molybdenum films and comparison with sputtered gold. Metall. Trans. 2 (1997) : 699.
4. Granath, K., and other. Mechanical issues of Mo back contacts for Cu(In,Ga)Se_2 devices. Thin Solid Films 170 (1989) : 1.
5. Smith, D.P. Scattering of low-energy noble gas ions from metal surfaces. J. Appl. Phys. 38 (1967) : 340.
6. Alleman, J. Enhanced Mo adhesion on glass with Cr interlayers for copper indium diselenide thin film devices. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 426 (1996) : 195.
7. Hoffman, D.W. and Thornton, J.A. Effects of substrate orientation rotation on internal stress in sputtered metal films. J. Vac. Sci. Technol. 16 (1979) : 134.
8. Bunshah, R.F., and other. Deposition technologies for films and coating : Development and application. New Jersey : Noyes Publications, 1982.
9. Vossen, J.L. and Ken, W. Thin film processes II. San diego : Academic Press Inc., 1991.
10. Chapman, B. Glow discharg processes : Sputtering and plasma etching. New York : John Wiley & Son, Inc., 1980.
11. ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
12. Philip, M. Thermal Physics. New York : W.A. Benjamin, Inc., 1965.
13. Granqvist, C.G. and Niklasson. Thin film technology. Gothenburg : Physics Department Chalmers University of Technology, n. d.
14. Ohring, M. The materials science of thin films. San Diego : Academic Press Inc., 1992.

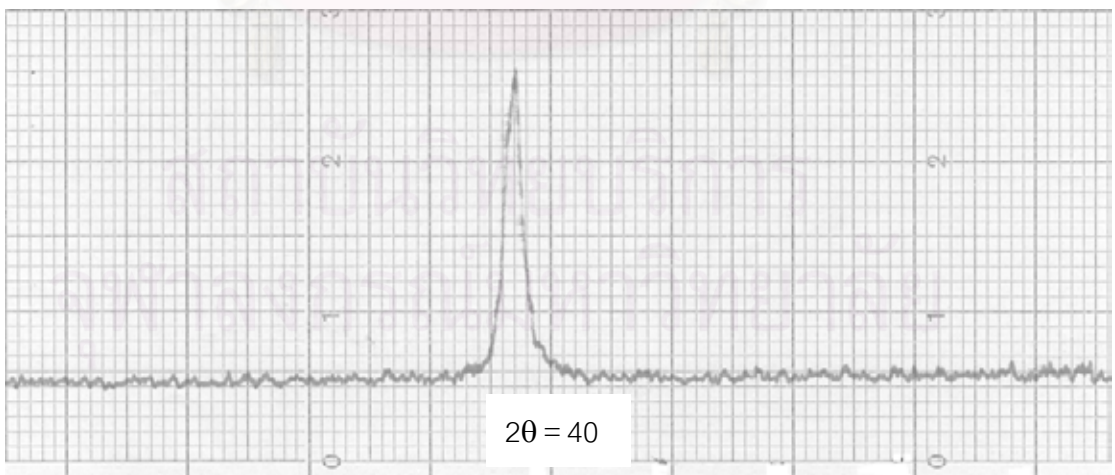
15. Maniv, S., and Wastwood, W.D. Calculation of the current-voltage-pressure characteristics of dc diode sputtering discharges. J. Appl Phys. 53 (February 1982) : 356.
16. Jackson, J.D. Classical electrodynamics. 2nd ed. Toronto : John Wiley & Son, Inc., 1975.
17. Cullity, B.D. Element of X-Ray diffraction. 3rd ed. Reading : Addison-Wesley Pubshing Company Inc., 1967.
18. Pauw, V.D. A method of measuring the resistivity and hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. Philips Technical Review 20 (1958) : 220.
19. Blood, P. and Orton, J.W. The electrical charecterization of semiconductor : Majority carriers and electron states. London : Academic Press, 1992.
20. Hoffman, D.W., and Thornton, J.A. Internal stress in Cr, Mo, Ta and Pt films deposited by sputtering from a planar magnetron source. J. Vac. Sci. Technol. 3 (March 1982): 20.
21. Scofield, J.H., and other. Sputtered molybdenum bilayer back contact for copper indium diselenide-based polycrystalline thin film solar cells. Thin Solid Films 260 (May 1995): 26.
22. Scofield, J.H. Effects of argon pressure on the properties of sputtered molybdenum films for CIS and CIGS thin film solar cell back contact application, 17 May 1994.
23. Kittle, C. Introduction to Solid State Physics. 7th ed. New York : John Wiley & Son, Inc., 1996.
24. Vink, T.J. , Somers, M.A.J. and other. Stress, Strain and microstructure of sputter-deposited Mo thinfilms. J. Appl. Phys. 70 (October 1991) : 4301.
25. Gordillo, G., Grizalez, M. and Hernandez, L.C. ¹Structural and electrical properties of DC sputtered molybdenum films. Solar energy materials & solar cells 51 (August 1997) : 327.
26. Thornton, J.A. and Hoffman D.W. Stress-Related effects in thin films. Thin Solid Films 171 (1989) : 5.
27. ชยานนท์ จันทร์สร. การยึดเกาะของฟิล์มบางโมลิบดีนัมบนกระจก. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ภาคผนวก

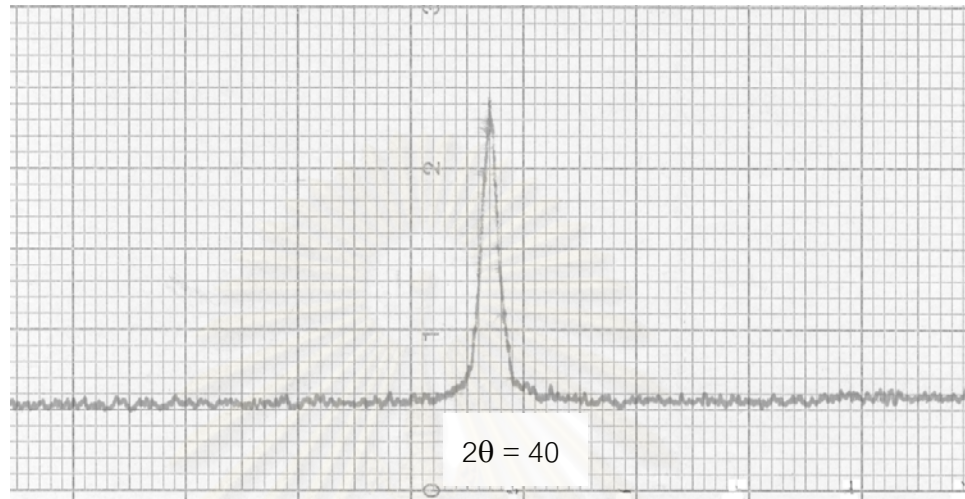
ตัวอย่างผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโพลีบิโคนัมที่สปีดเตออร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 4×10^{-3} mbar ของฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบและผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ



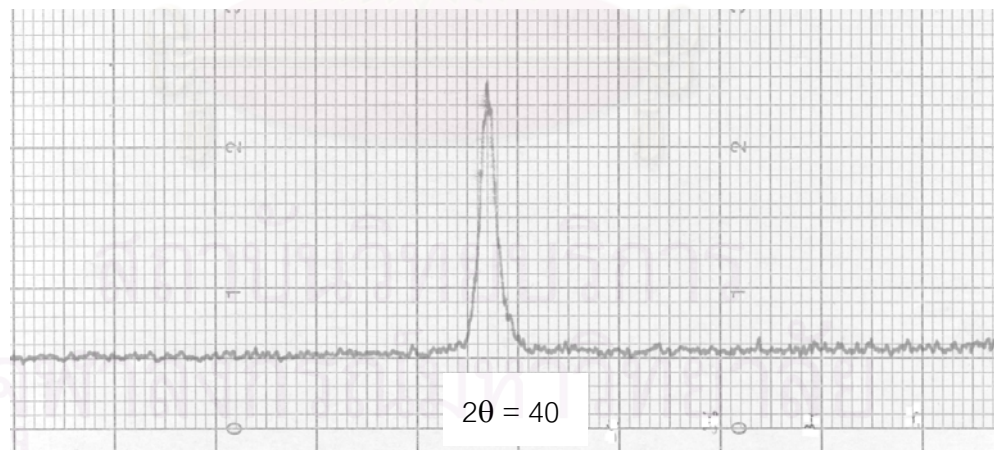
รูปที่ ผ-1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโพลีบิโคนัมที่สปีดเตออร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มไม่ผ่านการอบ



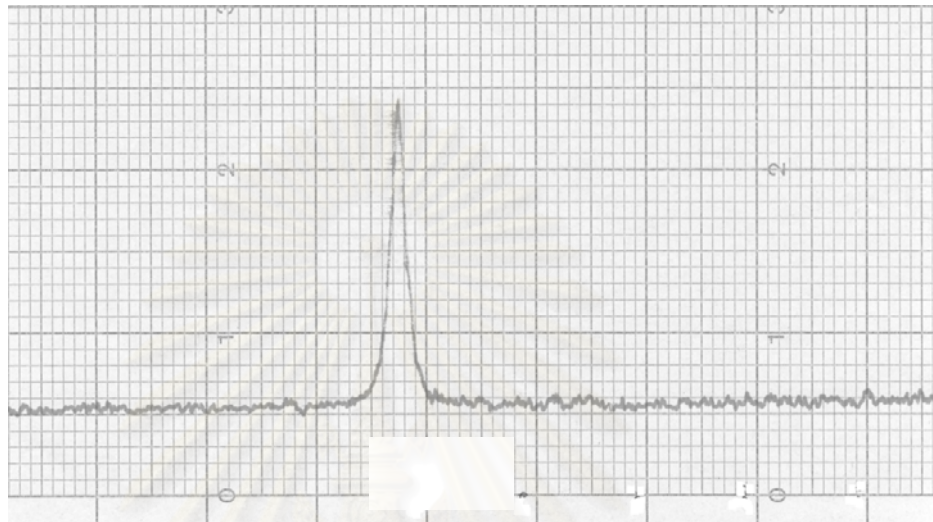
รูปที่ ผ-2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโพลีบิโคนัมที่สปีดเตออร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200°C



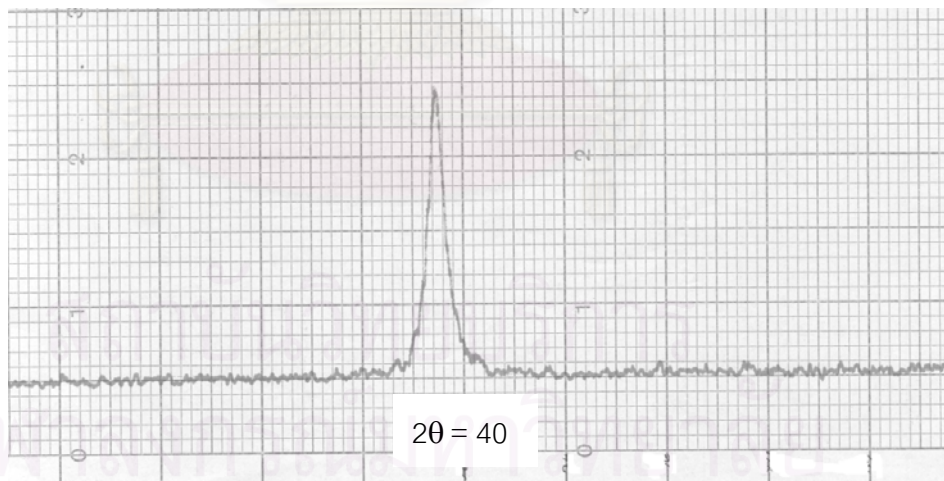
รูปที่ ผ-3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สปีดเตอรต์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ ผ-4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สปีดเตอรต์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ ๘-5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 450 °C



รูปที่ ๘-6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่สเป็คเตอร์ด้วยความดันแก๊สอาร์กอน 4×10^{-3} mbar เมื่อฟิล์มผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 °C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เฉลิมวัฒน์ วงศ์วานิชวัฒนา เกิดวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย