

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้าง
ด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์

Electrical Properties of Silicon Thin films
using Sputtering Technique



T119354

วิรัชทร์

ต้อดแก้ว

อินทิรา

ดิเจริญวิรุฬ

เอกจักรกฤษณ์

ภายโต

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 119354

วัน,เดือน,ปี - 7 S.ค. 2554

b.....
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้าง
ด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์

**Electrical Properties of Silicon Thin films
using Sputtering Technique**

โดย

นายวีรภัทร์ ต้อคแก้ว 50011498

น.ส.อินทิรา ดีเจริญวิรุฬ 50011956

นายเอกจักรกฤษณ์ ภาโยโต 50011966

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

ชื่อโครงการ สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์
Electrical Properties of Silicon Thin films using Sputtering Technique

จัดทำโดย นายวีรภัทร์ ตี้ออกแก้ว รหัสประจำตัว 50011498

นางสาวอินทิรา ศีเจริญวิรุฬ รหัสประจำตัว 50011956

นายเอกจักรกฤษณ์ ภายโต รหัสประจำตัว 50011966

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ



รายงานฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ชื่อ.....*รศ.ศักดิ์ ฝั้น*.....(อาจารย์ที่ปรึกษา)
(*รศ.ศักดิ์ ฝั้น*.....)

วันที่ *21* / *มก* / *54*

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้าง

ด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์

นายวีรภัทร์	ต้อดแก้ว	รหัส 50011498
น.ส.อินทิรา	ศิเจริญวิรุฬ	รหัส 50011956
นายเอกจักรกฤษณ์	ภายโต	รหัส 50011966
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	อาจารย์ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันตัวตรวจวัดแสงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการคมนาคม ด้านการแพทย์ และการสื่อสาร เป็นต้น ดังนั้นจึงมีห้องวิจัยและหน่วยงานอุตสาหกรรมยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และในโครงการนี้เป็นอีกงานวิจัยที่พัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนเพื่อเป็นส่วนของชั้นดูดกลืนแสง โดยทำการปลูกฟิล์มบางซิลิคอนด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอร์บนฐานรองซิลิคอน และทำการศึกษาคสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ดังเช่น สภาพต้านทาน (Resistivity: ρ) โดยใช้เทคนิคการวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว (four point probe) และใช้การวัดโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) เพื่อหาค่าความหนาแน่นสารเจือ (Doping concentration :N) และสภาพคล่องตัวของพาหะ (Mobility: μ)

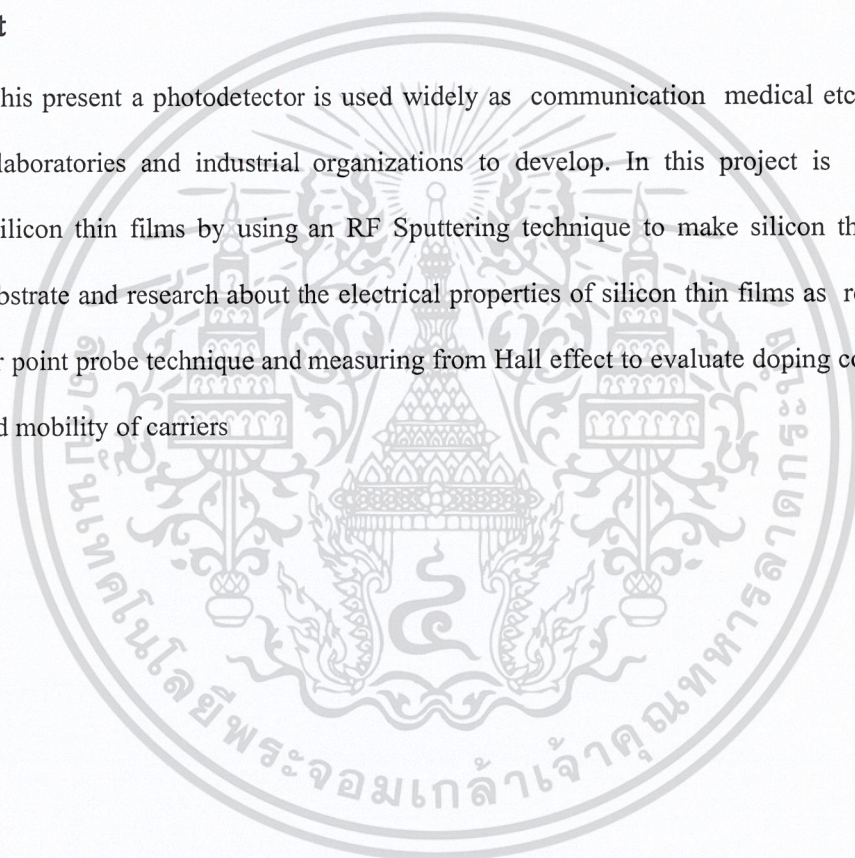
Electrical Properties of Silicon Thin films

using Sputtering Technique

Mr. Weerapat	todkaew	ID 50011498
Miss Intira	Deejoenvirun	ID 50011956
Mr. Aekjakkrit	Phaito	ID 50011966
Assistant Professor Dr. Surasak Neimcharoen		Adviser
Education Year 2010		

Abstract

This present a photodetector is used widely as communication medical etc. Therefore, research laboratories and industrial organizations to develop. In this project is research to develop silicon thin films by using an RF Sputtering technique to make silicon thin films on silicon substrate and research about the electrical properties of silicon thin films as resistivity by using four point probe technique and measuring from Hall effect to evaluate doping concentration values and mobility of carriers



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา
โครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนอบรมสั่งสอน
และให้ความอนุเคราะห์ในทุกๆด้าน ขอขอบคุณ คุณอิสระ ศรีชนชัย คุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์ และ
คุณชนวัฒน์ ทองหนัก ที่ได้ให้การช่วยเหลือมาโดยตลอด และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา
ที่รักยิ่งของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด หากมีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้า
ต้องขออภัยมา ณ ที่นี้



นายวีรภัทร์

ต๊อดแก้ว

น.ส.อินทิรา

ดีเจริญวิรุฬ

นายเอกจักรกฤษณ์

กายโต

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 โครงสร้างของสารของแข็ง	4
2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์	6
2.2.1 กระบวนการสปีดเตอร์	6
บทที่ 3 กระบวนการทดสอบและกระบวนการสร้าง	11
3.1 การทดสอบ	11
3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง	11
3.1.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	11
3.1.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	13
3.1.1.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)	15
3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.1 ระบบวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe)	16
3.1.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของของฟิล์มบางที่มีการเปลี่ยนแปลง ความหนาของฟิล์ม	17
3.1.2.3 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของ ฟิล์มบาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม	19
3.1.3 การออกแบบลวดลายที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม บางชนิด	21
3.1.3.1 การออกแบบลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน	23
3.1.3.2 การออกแบบลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)	24
3.2 กระบวนการสร้าง	25
3.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์	27
3.2.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี	28
3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน	28
3.2.4 กระบวนการแพร์สารเจือ	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	30
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ	30
4.1.1 เปรียบเทียบสีของฟิล์มบาง โพลีซิลิคอน	30
4.1.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบาง โพลีซิลิคอน โดยใช้วิธี (Scanning Electron Microscope : SEM)	31
4.1.3 ตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)	34
4.1.4 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุนฟิล์มบาง โพลีซิลิคอน	38
4.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง โพลีซิลิคอน	39
4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ตรวจสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าของ फिल्मบาง โพลีซิลิคอน ที่การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม	41
4.2.2 ตรวจสอบความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	43
บรรณานุกรม	45



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	2
รูปที่ 1.1	2
รูปที่ 2.1	5
ในการจัดเรียงตัวของอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (Poly crystalline)	
(ค) ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline)	
รูปที่ 2.2	7
รูปที่ 2.3	8
รูปที่ 2.4	9
รูปที่ 3.1	12
รูปที่ 3.2	12
รูปที่ 3.3	14
รูปที่ 3.4	15
รูปที่ 3.5	17
รุ่น Omni Map ® RS35	
รูปที่ 3.6	18
รูปที่ 3.7	19
รูปที่ 3.8	22
รูปที่ 3.9	23
รูปที่ 3.10	24
รูปที่ 3.11 ก	25
รูปที่ 3.11 ข	26
รูปที่ 4.1(ก)	30
(ข)	
(ค)	
(ง)	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 (ก) ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 30 นาที	31
รูปที่ 4.2 (ข) ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 60 นาที	31
รูปที่ 4.2 (ค) ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 90 นาที	32
รูปที่ 4.2 (ง) ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 240 นาที	32
รูปที่ 4.2 (จ) ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 30 นาที	33
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสร้าง (min) กับ ความหนาของฟิล์มบาง (nm)	33
รูปที่ 4.4 ก แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที	34
รูปที่ 4.4 ข แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที	34
รูปที่ 4.4 ค แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที	35
รูปที่ 4.4 ง แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที	35
รูปที่ 4.4 จ แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที	36
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสร้าง (min) กับ ขนาดของเกรน (nm)	36
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงชนิดของธาตุที่อยู่บนฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างที่เวลา 60 นาที	38
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 30 นาที	39
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 60 นาที	39
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 90 นาที	40
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 240 นาที	40
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 360 นาที	41
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	41
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1234})$ กับค่าสนามแม่เหล็ก	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันได้มีการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ มากมายเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น เช่น การเคลือบกระจกด้วยฟิล์มบางทำให้กระจกสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ การเคลือบผิววัสดุต่าง ๆ เพื่อความคงทนสวยงาม หรือการนำมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น โดยวัสดุที่จะนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางได้ดี ฟิล์มบางซิลิคอนจะแบ่งตามโครงสร้างออกเป็น 3 ชนิด คือ ผลึกเชิงเดี่ยวซิลิคอน โพลีซิลิคอน และ อมอร์ฟัสซิลิคอน ในโครงการนี้เลือกศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอน

ฟิล์มบางซิลิคอนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้หลายชนิด เช่น สร้างเป็นส่วนเกทของมอสทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ยังมีการนำฟิล์มบางซิลิคอนมาสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโดยใช้เป็นส่วนของชั้นดูดกลืนแสง ซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น สร้างได้ง่ายและทำการควบคุมความหนาของชั้นดูดกลืนแสงได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกระแสแสงได้จากความหนา และ ลวดลายของตัวตรวจวัดแสง นอกจากนี้ฟิล์มบางซิลิคอนสามารถเลือกฐานรองได้หลายชนิด เช่น กระจก ซิลิคอน และ ฐานรองที่มีความยืดหยุ่นสามารถบิดงอได้ เช่น พลาสติก เป็นต้น

ในการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสร้างฟิล์มด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition) เทคนิคการสปัตเตอร์ โดยโครงการนี้เลือกการสปัตเตอร์ เนื่องจากมีข้อดี คือ สร้างได้ง่าย เป็นปฏิกิริยาทางฟิสิกส์และใช้อุณหภูมิในการสร้างต่ำกว่า ซึ่งต่างจากเทคนิค LPCVD ที่วิธีการสร้างมีความยุ่งยาก ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งสารเคมีที่ใช้มีอันตรายกว่า

ในอดีตส่วนของชั้นดูดกลืนแสงในอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงนิยมสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอน แต่เนื่องจากผลึกซิลิคอนสร้างได้ยากและมีราคาแพง ในโครงการนี้จึงเลือกใช้ซิลิคอนสร้างเป็นส่วนดูดกลืนแสงโดยเริ่มจากการทดสอบสร้างฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการสปัตเตอร์ลงบนแผ่น

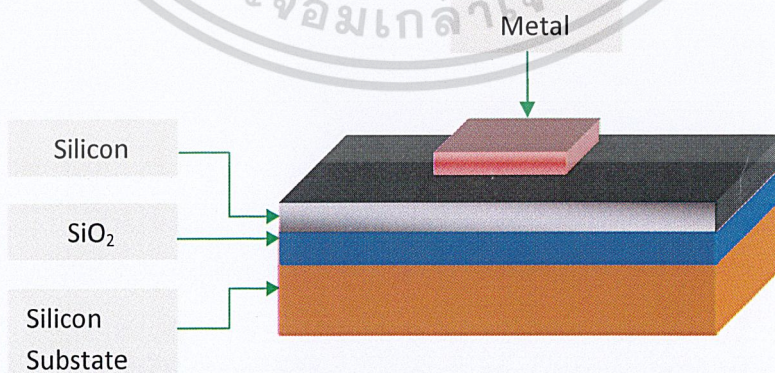
กระจกแทนฐานรองซิลิคอนที่มีราคาแพง จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 ฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างบนฐานรองที่เป็นกระจก

การศึกษาคูณสมบัติทางโครงสร้างสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิว ส่วนการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าจะใช้ ระบบวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe)

เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติฟิล์มบางซิลิคอนแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนลงบนฐานรองซิลิคอน (Si) ซึ่งมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นฉนวนชั้นระหว่างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนและฐานรอง จากนั้นสร้างขั้วโลหะลงบนชั้นฟิล์มบางซิลิคอนและทำการตรวจสอบรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มบางกับโลหะว่ามีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบช็อคตักกีร์หรือไม่



รูปที่ 1.2 โครงสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนที่ถูกเชื่อมต่อกับขั้วโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนบนฐานรองด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิลิคอน เช่น สภาพพื้นผิว ขนาดเกรน ความหนาของชั้นฟิล์มบาง เป็นต้น
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนด้วย Hall effect และ TLM
5. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มบางซิลิคอนไปสร้างเป็นส่วนของชั้นดุกกลืนแสงในอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนบนฐานรองที่ด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์
2. นำฟิล์มบางที่สร้างได้ไปวัดผลต่างๆเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า
3. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการวัดค่าเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนให้มีคุณสมบัติที่ดี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความสามารถในการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนบนฐานรองกระจกสไลด์ด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์ได้
2. เรียนรู้เทคนิคการศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีต่างๆได้
3. ได้รับความรู้จากการศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างของฟิล์มบางซิลิคอน

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างของสารของแข็ง

วัสดุของแข็งเกิดขึ้นได้โดยการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมจำนวนมากมายของธาตุ แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในวัสดุสารของแข็งและรูปแบบการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม จะมีผลไปถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารของแข็งนั้นๆด้วย เราอาจพิจารณาจัดแบ่งลักษณะ โครงสร้างของวัสดุสารของแข็ง ตามลักษณะการเกาะเกี่ยวและการเรียงตัวของอะตอมได้เป็น 2 ประเภท คือ

โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Non crystalline) หรือ อมอร์ฟัส (Amorphous)

โครงสร้างแบบผลึก (Crystalline)

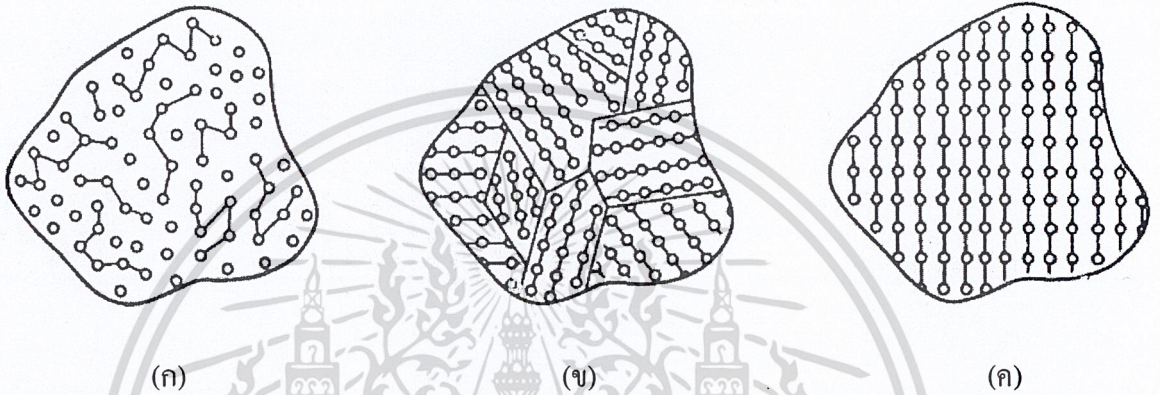
1. ออสันฐาน หรือ อมอร์ฟัส (Amorphous)

อสันฐาน หรืออมอร์ฟัส หมายถึง ลักษณะ โครงสร้างของสารของแข็งซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็น ไปอย่างไม่มีระเบียบไม่มีรูปร่างที่แน่นอน อะตอมต่างๆเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ ไม่มีตำแหน่งที่อยู่ที่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 1 จึงทำให้วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเช่นนี้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมซึ่งไม่สามารถจะควบคุมได้จึงไม่เหมาะสม หรือไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยและทดลองสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบอมอร์ฟัสกันอย่างกว้างขวาง และประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง กล่าวคือ มีสิ่งประดิษฐ์บางชนิดสามารถสร้างจากอมอร์ฟัสได้ แต่คุณภาพหรือประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ จะต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ดังนั้นการผลิตในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่เป็นที่นิยม และจุดเด่นของวัสดุประเภทนี้ก็คือ การใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำให้วัสดุเป็นผลึก ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์จากอมอร์ฟัส ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางของอมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น

2. ผลึก (Crystalline)

ผลึก หมายถึงสารของแข็งที่มีลักษณะ โครงสร้างภายในที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน โดยอะตอมต่างๆจะมีตำแหน่งที่อยู่ที่แน่นอน ในทาง

ปฏิบัติจะหาผลึกที่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ยาก เพราะอย่างไรก็ตามมักจะเกิดจุดบกพร่อง (defect) หรือจุดตำหนิบ้างไม่มากก็น้อย ทำให้ความเป็นระเบียบของอะตอมสูญเสียไป จุดบกพร่องมีหลายลักษณะและมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างง่ายๆของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นก็คือ การขาดหายไปของอะตอมในบางจุด บางตำแหน่งซึ่งควรจะมียอะตอมอยู่ หรือการมีอะตอมเข้ามาอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ควรจะมียอยู่ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างภายในของสารของแข็ง โดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของอะตอม

(ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (Poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline)

ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงจัดแบ่งวัสดุสารของแข็งที่เป็นผลึกออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ผลึกที่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีจุดบกพร่อง หรือตำหนิมิจำนวนน้อยอะตอมส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีรูปแบบที่แน่นอนเหมือนกันทั้งหมด ผลึกนี้นิยมเรียกกันว่าผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline) ดังแสดงในรูปที่ (ค)

ข) ผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีจุดบกพร่องเป็นจำนวนมากหรือมีลักษณะของผลึกแต่ไม่ต่อเนื่องแน่นอน หรือมีความเป็นระเบียบน้อย ดังแสดงในรูปที่ (ข) วัสดุดังกล่าวนิยมเรียกกันว่าผลึกโพลีคริสตัล (Polycrystalline) อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำส่วนมากที่ใช้งานกันในปัจจุบันสร้างมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน และอาจมีบ้างที่ใช้ผลึกหลายรูปของซิลิคอนหรือเรียกง่ายๆว่าโพลีซิลิคอน สร้างเป็นส่วนเกต (gate) ของมอสทรานซิสเตอร์ (MOS Transistor) เป็นต้น

2.2 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสปีดเตอร์

กระบวนการสปีดเตอร์ได้ถูกค้นพบในปี 1852 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต กรูฟ (Sir William Robert Grove) และได้รับการพัฒนาต่อมาเป็นกระบวนการปลูกฟิล์มบางโดย แลงมัวร์ (Langmuir) การสปีดเตอร์เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยอาศัยการชนกระแทกของอนุภาคพลังงานสูง เพื่อถ่ายเทโมเมนตัมให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาและเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศตกลงบนฐานรองสารกึ่งตัวนำ กระบวนการนี้สามารถสร้างให้เกิดสถานะผิวบนรอยต่อของโลหะสารกึ่งตัวนำได้ รวมไปถึงสภาวะเงื่อนไขขณะกำลังสปีดเตอร์ได้แก่ กำลังในการสปีดเตอร์ ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง ระยะเวลาในการสปีดเตอร์ ล้วนส่งผลถึงลักษณะสมบัติของฟิล์มบางได้

ข้อดีของการสปีดเตอร์

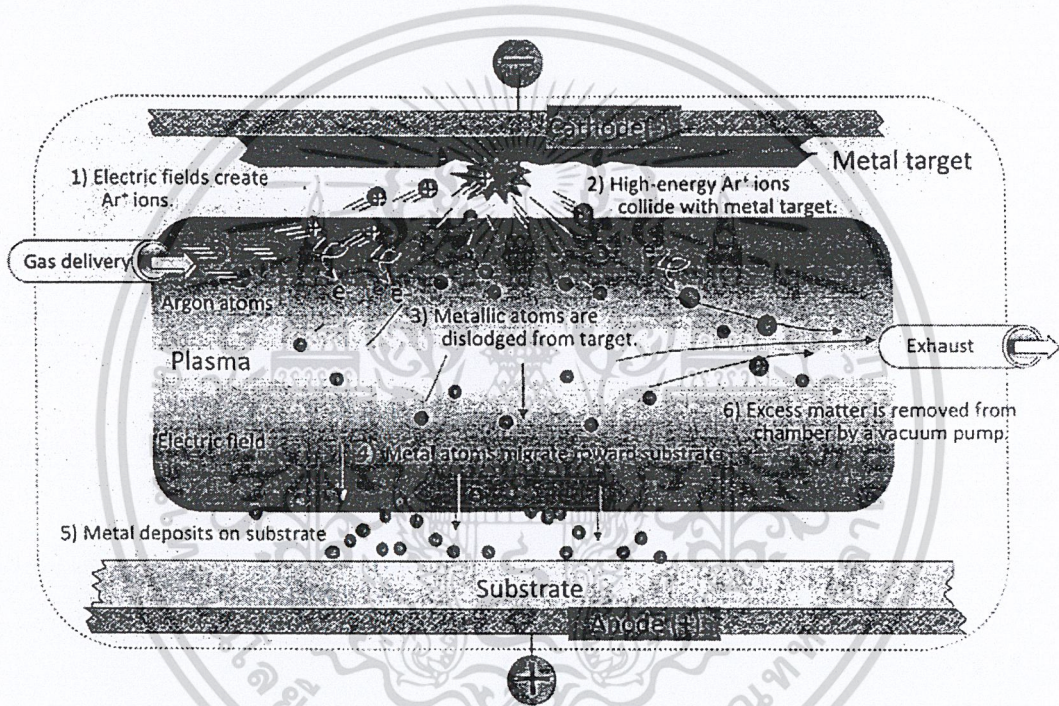
1. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุโลหะและฉนวนได้
2. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุจุดหลอมเหลวสูงและต่ำได้
3. ควบคุมความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ดี
4. สร้างชั้นอัลลอยได้ดี
5. ฟิล์มบางที่สร้างมีความบริสุทธิ์สูง

2.2.1 กระบวนการสปีดเตอร์

ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์แสดงดังภาพที่ 3.1 ประกอบไปด้วยแผ่นคู่ขนานอยู่ภายในระบบสุญญากาศ ด้านหนึ่งคือเป้าซิลิคอนหรือซิลิกอนคาร์ไบด์ ส่วนอีกด้านหนึ่งคือฐานรองเวเฟอร์หรือซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อป้อนก๊าซอาร์กอนและจ่ายกำลังงานให้ระบบสปีดเตอร์ทำให้เกิดโคล์ดคาทอด หรือการสร้างพลาสมาเพื่อให้เกิดอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสมาอาร์กอนไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่เป้าซิลิคอน ระหว่างที่อาร์กอนไอออนถูกเร่งจะได้รับโมเมนตัมและเข้าชนเป้าซิลิคอน อะตอมของซิลิคอนเมื่อถูกอาร์กอนไอออนชนก็จะได้รับการถ่ายเทโมเมนตัมและหลุดออกมาจากเป้าวิ่งเข้าสู่แผ่นฐานรองเวเฟอร์ควมแน่นเป็นฟิล์มบาง

สิ่งสำคัญในกระบวนการสปีดเตอร์ก็คืออาร์กอนไอออนในพลาสมา ก๊าซอาร์กอนถูกใช้ในการสปีดเตอร์เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมากและเป็นก๊าซเฉื่อยจึงไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มบางที่สร้างหรือเป้าที่ใช้สร้างฟิล์มบาง ปกติอะตอมของก๊าซอาร์กอนมีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า แต่

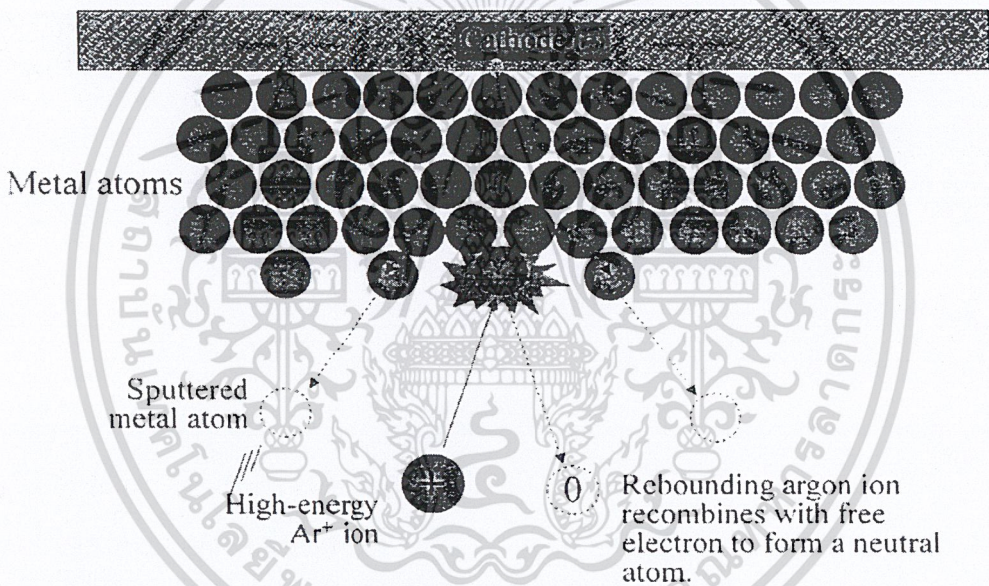
เมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอนจากภายนอกพลังงานสูง อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดของอะตอมอาร์กอน จะหลุดออกไป ทำให้อะตอมอาร์กอนแสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก ดังนั้นอาร์กอนไอออนที่อยู่ในพลาสมาจะถูกรบกวนกระทำจากศักย์ไฟฟ้าลบที่ขั้วคาโทดให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่งเข้าชนเป้าและถ่ายทอดโมเมนตัมแก่อะตอมของเป้าให้หลุดออกมา อะตอมของเป้าซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าจะหลุดออกมาผ่านพลาสมา (จำนวนเล็กน้อยจะถูกไอออนไนซ์) ตกลงบนฐานรองเวเฟอร์เกิดเป็นฟิล์มบาง พลังงานที่ให้แก่อะตอมที่จะชนเป้าจะต้องมากพอที่จะชนให้อะตอมหลุดออกจากเป้าได้แต่ต้องไม่มากเกินไปจนอาร์กอนไอออนเข้าไปฝังอยู่ในเป้าซึ่งส่วนใหญ่ค่าพลังงานที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 500 - 5000 eV



รูปที่ 2.2 กระบวนการสปีดเตอร์ที่เกิดภายในแชมเบอร์

การทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาจากผิวหน้าคล้ายกับการชนกันของลูกบิลเลียด เมื่ออาร์กอนไอออนชนเป้าและทำให้อะตอมของเป้าหนึ่งหรือสองอะตอมหลุดออกมดั่งรูปที่ 3.1 สปีดเตอร์ยิลต์ คือจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกจากเป้าต่อจำนวนไอออนที่วิ่งเข้าชน ดังนั้นค่ายิลต์หมายถึงความถี่อัตราการสปีดเตอร์ ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ประมาณ 0.5-1.5 ตัวอย่างเช่น ค่าสปีดเตอร์ยิลต์ 0.5 หมายความว่าโดยเฉลี่ยไอออนของอาร์กอนไอออนสองไอออนสามารถวิ่งชนแล้วทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาได้หนึ่งอะตอม สปีดเตอร์ยิลต์ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบ มวลพลังงานของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้า สารประกอบและรูปร่างของเป้า

การโค้วดิซซาร์ทคือ การสร้างพลาสมาด้วยการให้กระแสไฟฟ้าหลายร้อยจนถึงหลายกิโลโวลต์ ไหลผ่านก๊าซ ที่ความดันต่ำ อิเล็กตรอน ไอออนและอนุภาคอื่นๆ ในบริเวณพลาสมาจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วไฟฟ้า อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนไปสู่ขั้วไฟฟ้าบวกได้เร็วกว่าไอออนบวกที่เคลื่อนที่ไปสู่ขั้วไฟฟ้าลบได้ช้ากว่าเนื่องจากมีมวลมากกว่า ผลจากความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันของพาหะส่งผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้าบวกในบริเวณพลาสมา ในการที่ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วคาโทดต้องผ่านบริเวณคาร์กสเปส บริเวณคาร์กสเปสเกิดมาจากการขาดอิเล็กตรอน ในบริเวณนั้นและเป็นบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรวมถึงสนามไฟฟ้ามีค่าสูง ทำให้ไอออนบวกถูกเร่งเข้าชนขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนทุกตัวก็จะหลุดออกมาจากคาโทดและวิ่งเข้าบริเวณคาร์กสเปสเพื่อกลับเข้าสู่กระบวนการสร้างโค้วดิซซาร์ทอีกครั้งหนึ่ง



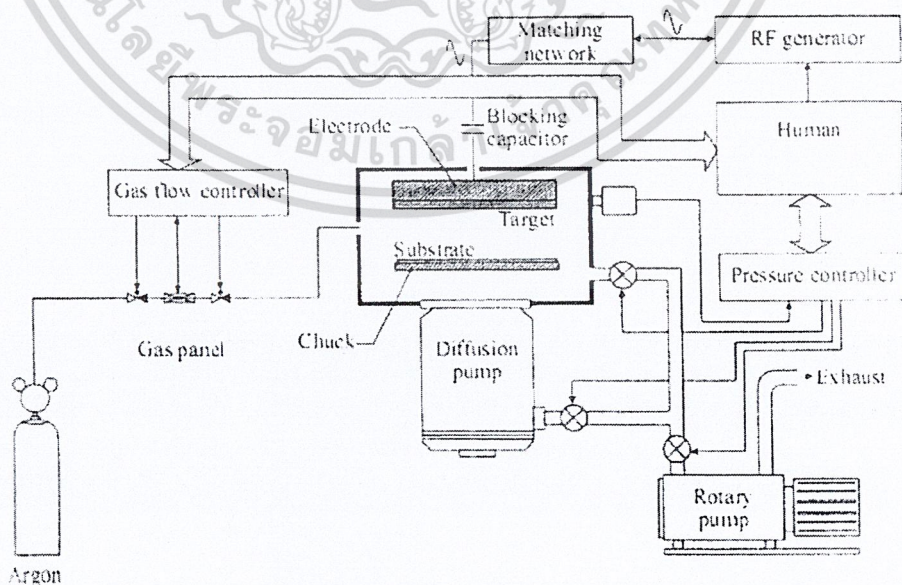
รูปที่ 2.3 การบอมบ์บาร์ดของ Ar⁺ ที่ก่อให้เกิดอะตอมในกระบวนการสปัตเตอร์

เนื่องจากการสปัตเตอร์นั้นเกิดขึ้นในบริเวณพลาสมาที่ด้านหน้าและรวมไปถึงด้านข้างของเป้าด้วย จึงต้องใช้ฉนวนป้องกันไม่ให้เกิดการสปัตเตอร์ด้านข้างของเป้า แต่ฉนวนป้องกันนั้นจะถูกวัสดุที่นำมาใช้สปัตเตอร์เคลือบไปด้วยในขณะที่สร้างฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนหรือทำความสะอาดเป็นประจำเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการปนเปื้อน อายุการใช้งานของเป้าที่ใช้สปัตเตอร์จะเปลี่ยนเป้าเมื่อเหลือเป้าน้อยกว่าร้อยละ 50

พลังงานส่วนมากที่ใช้ในการสปีดเตอร์ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนหรือปลดปล่อยพลังงานในรูปอิเล็กตรอนทุติยภูมิ รังสีเอ็กซ์และ โฟตอน ทำให้ต้องมีการระบายความร้อนให้แก่เป้า ส่วนบนฐานรองนอกจากอะตอมของเป้าที่ตกลงบนฐานรอง ยังมีอนุภาคอีกหลายชนิดที่ตกลงมา ด้วยตามรูป 3.2 ได้แก่ สปีดเตอร์อะตอม อิเล็กตรอนพลังงานสูง อนุภาคเป็นกลาง ไอออนของสิ่งปนเปื้อน ไอออนลบ รังสีเอ็กซ์จากการบอมบ์บาร์ดเป้า ซึ่งสามารถทำให้ฐานรองร้อนขึ้นได้จนมีอุณหภูมิสูงถึง 350°C จนอาจทำให้ฟิล์มที่เกิดมีลักษณะไม่เรียบ อุณหภูมิที่สูงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดออกไซด์ที่ผิวหน้าของโลหะในขณะที่สร้างฟิล์มโลหะ และอนุภาคหลายชนิดที่ตกบนฐานรองเวเฟอร์ขณะที่สปีดเตอร์สามารถสร้างให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของเวเฟอร์หรือก่อให้เกิดสถานะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำทำให้มีผลต่ออุปกรณ์ที่สร้างได้ จึงต้องมีการระบายความร้อนแก่ฐานรอง

อีกหนึ่งปัจจัยในการสปีดเตอร์คือก๊าซที่ใช้ในระหว่างสปีดเตอร์จะต้องบริสุทธิ์มากเพราะถ้าหากก๊าซที่ใช้มีสิ่งเจือปน สิ่งเจือปนสามารถเข้าไปรวมตัวกับอะตอมของเป้าที่ใช้สร้างฟิล์มแหล่งกำเนิดหลักๆ ของสารเจือปนเหล่านี้เกิดขึ้นจาก ก๊าซสปีดเตอร์ที่ไม่สะอาดเพียงพอ เอาท์แก๊สจากชิ้นงานเวเฟอร์เอาท์แก๊สจากผนังแชมเบอร์ รอยรั่วซึมของแชมเบอร์ การสปีดเตอร์ที่ความดันต่ำเป็นเทคนิคที่สร้างฟิล์มบาง ให้มีสิ่งเจือปนแปลกปลอมน้อยลงและมีอัตราการเกิดที่สูงขึ้น

ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอโนดของระบบสปีดเตอร์ที่เหมาะสม ต้องมีระยะห่างที่ทำให้มีอัตราการเกิดสปีดเตอร์อะตอมมากที่สุด



รูปที่ 2.4 ระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์

สปีดเตอร์ไดโอดแบบกระแสตรงมีปัญหาในการสปีดเตอร์เป่าที่เป็นฉนวนหรือสารไดอิเล็กตริก เพราะขั้วไฟฟ้าคาโทดจะมีประจุบวกมาอยู่ที่ผิวหน้าของเป่า และส่งผลให้ไม่สามารถเกิดการสปีดเตอร์ขึ้นได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนา สปีดเตอร์ไดโอดแบบกระแสสลับหรืออาร์เอฟ สปีดเตอร์ ตามรูป 3.3

โดยจะใช้สนามไฟฟ้ากระแสสลับในย่านความถี่คลื่นวิทยุเป็นตัวสร้างพลาสมา มีค่าความถี่ 13.56 MHz แทนการสร้างพลาสมาด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงธรรมดา ซึ่งสนามไฟฟ้าอาร์เอฟถูกไบอัสที่ด้านหลังของเป่า ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมาจะอยู่ในสนามอาร์เอฟ แต่เนื่องจากอาร์เอฟเป็นความถี่สูงทำให้มีอิเล็กตรอนเท่านั้นที่ตอบสนองได้ทันต่อความถี่อาร์เอฟทำให้เป่ามีประจุลบจำนวนมากอยู่ที่ผิวหน้า ดึงดูดให้อาร์กอนไอออนซึ่งมีประจุบวกวิ่งเข้าชน ดังนั้นอาร์เอฟ สปีดเตอร์จึงสามารถสปีดเตอร์ได้ทั้งเป่าตัวนำและเป่าฉนวน



บทที่ 3

การทดสอบและกระบวนการสร้าง

3.1 การทดสอบ

3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง

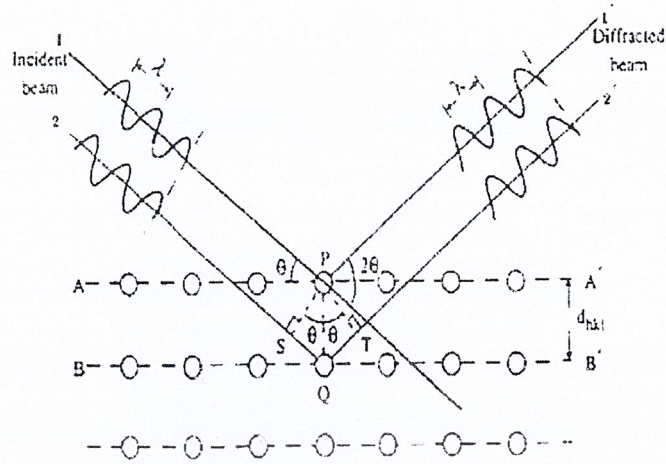
3.1.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบบนสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึก พหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่เป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ.2455 W.H.Bragg และ W.L.Bragg ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองได้ว่า ผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบบนโดยมุมตกกระทบบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบบน ดังแสดงในสมการ 3.1

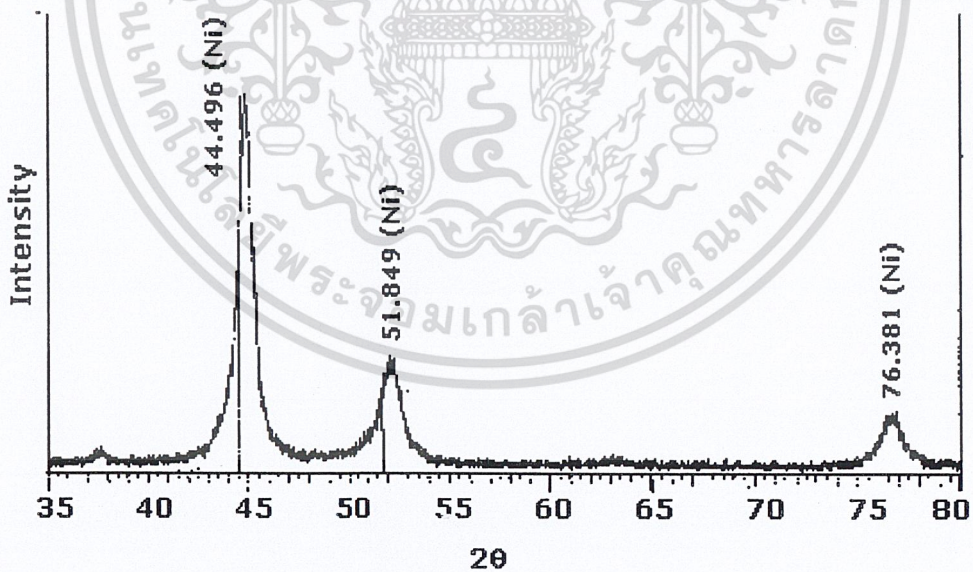
$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (3.1)$$

โดยที่ d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบบ
n	คือ	ลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
λ	คือ	ความยาวคลื่น



รูปที่ 3.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่รังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

รูปที่ 3.2 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพิก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของ โครงผลึก (lattice constant) สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาค่าได้จากสมการ 3.2

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (3.2)$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลหาได้จากสมการ 3.3

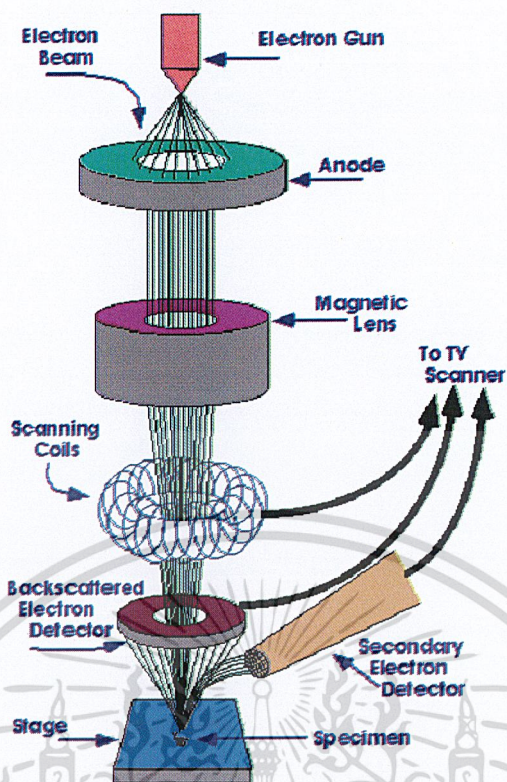
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
 h, k, l คือ ระนาบผลึก

3.1.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.3 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด ผ่านขั้วอาโนด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับให้กลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบ xy เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



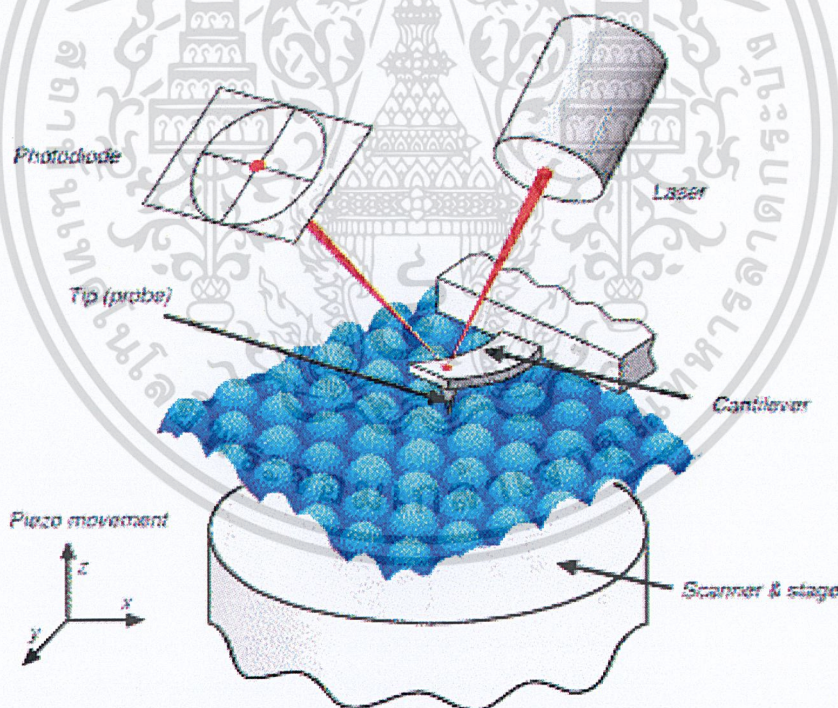
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
-easy	5 μm	0-2 μm
-skilled	0-2 μm	10 μm
-special	0-1 μm	0-5 μm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
-transmission	Yes	Yes
-refraction	Yes	Yes
-diffraction	Some	Many
Field of view	Small	Large enough
Signal	Only as image	Available for processing
Cost	Low	High

3.1.1.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)

เครื่อง AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้ทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน โดยสามารถศึกษาแบบ high resolution ที่มีความละเอียดอยู่ในระดับมากถึง 0.1 นาโนเมตร เครื่อง AFM ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ซึ่งติดอยู่กับคานยื่นที่โค้งงอได้ที่เรียกว่า แคนทิลเวอร์ (cantilever) โดยโพรบหรือ AFM tip นั้นจะมีรัศมีที่ปลายเข็ม (end radius) อยู่ในระดับไม่กี่นาโนเมตร (ทั่วไปมีขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร) ดังนั้นกระบวนการผลิตคานยื่นชนิดนี้จะอาศัยการผลิตแบบ microlithography processes คล้ายคลึงกับการผลิต computer chips เมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายเข็มแหลมนี้ไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง จะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มแหลมกับอะตอมหรือ โมเลกุลบนพื้นผิวเกิดขึ้น เช่น แรง Van de Waals และแรงพันธะเคมีอื่นๆ



รูปที่ 3.4 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

จากแรงกระทำนี้เองสามารถทำให้คานยื่นโค้งงอ (เกิด deflection ซึ่งเป็นไปตาม Hooke's law) และจะถูกตรวจวัดได้ด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไปกระทบที่ส่วนปลายของคานยื่น

และสะท้อนมายังจูดรับแสง (photodiodes หรือ laser detector) นั่นเอง ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะมีขนาดน้อยมากในระดับพิโคนิวตัน (picoNewton, pN) ก็ตาม แต่เครื่อง AFM ก็สามารถตรวจวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุ ในขณะที่สแกนบนพื้นผิวได้ด้วยความช่วยเหลือของอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง (piezoelectric tube) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิวที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (monitor) ทำให้สามารถศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างของพื้นผิวในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ขนาดและการจัดเรียงตัวได้

3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity : ρ) ของแท่งตัวนำ สามารถทำได้โดยง่ายในกรณีที่สามารเตรียมแท่งสาร ที่มีหน้าตัด A มีขนาดความยาว l และที่สำคัญต้องทำขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งกึ่งตัวนำ I จะได้ว่า

$$J = \sigma \cdot E \quad (3.4)$$

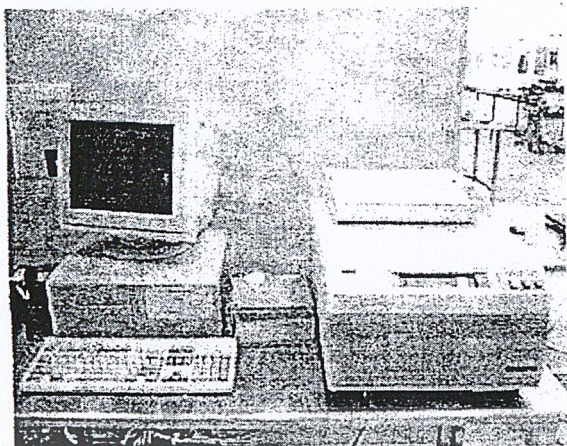
$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho l} V \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{AV}{I l} \quad (3.6)$$

3.1.2.1 ระบบวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe)

ระบบวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe) เป็นระบบที่ใช้วัดค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity) และค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance) ของฟิล์มบางตัวอย่าง

งานทดสอบกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสี่ขั้ว ของบริษัท Prometrix รุ่น Omni Map ® RS35

หลักการการทำงานของระบบวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe) ก็คือจะใช้ขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว ที่มีการวางขบวนขั้วไฟฟ้าเป็นแนวเส้นตรงโดยที่ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะมีระยะห่างเท่ากัน วางขบวนขั้วไฟฟ้างดงกล่าวลงบนผิวหน้าของฟิล์มบางตัวอย่าง จากนั้นจะมีการให้กระแสแก่ขั้วด้านนอกแล้ววัดความต่างศักย์ที่ขั้วที่อยู่ด้านใน จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานและความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบาง

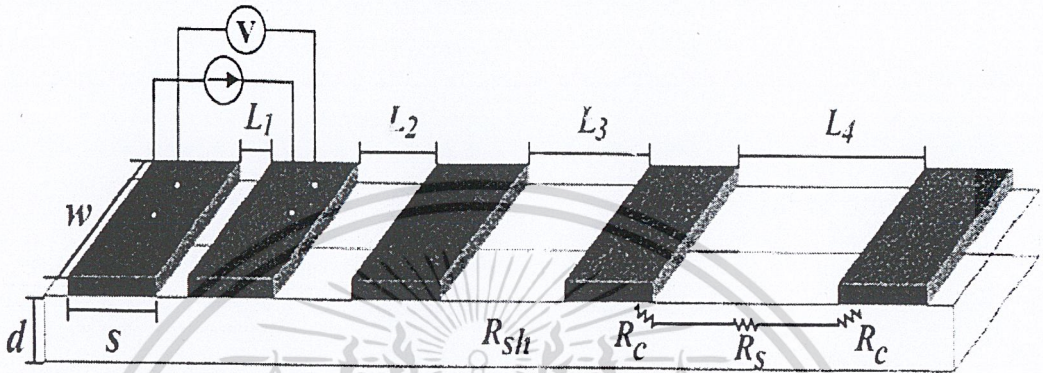
3.1.2.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนา

ของฟิล์ม

กระบวนการสร้างลวดลายที่ใช้วัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า หรือลวดลายในการวัด TLM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะอะลูมิเนียมเพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิก โดยมีขนาดของขั้วไฟฟ้า ($S \times W$) เท่ากับ 200 – 400 μm และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (L) ต่างๆกัน คือ 80, 160, 320 และ 640 μm ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.6 ความหนา (d) ของฟิล์มจะถูกกำหนดด้วยเวลาในการสปีดเตอร์ คือ 240 และ 360 นาที โดยสามารถหาความหนาของฟิล์มบางได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีความหนา 510 และ 1600 nm ตามลำดับ

ในการทดลองนำชิ้นงานที่สร้างมาทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 3.6 ซึ่งในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนด้วยวิธี TLM ในการทดลองนี้ใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ระบบวัดความต่างศักย์โดยจ่ายกระแสค่าคงที่ 10 mA

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ กัน นำมาคำนวณหาความต้านจากกฎของโอห์ม ($V = IR$) จากนั้นนำค่าความต้านทานที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ ρ/dw ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 3.7, 3.8 และ 3.9 ดังนี้



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการวัดด้วย TLM และตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง

จากรูปที่ 3.6 จะได้ว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$R = 2R_c + R_s \quad (3.7)$$

โดยความต้านทานในเนื้อสาร R_s มีค่าเท่ากับ

$$R_s = \frac{\rho}{(d)(w)} L \quad (3.8)$$

แทนสมการที่ 3.8 ลงในสมการที่ 3.7

จะได้ R อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นที่มีความลาดชันเท่ากับ ρ/dw ดังสมการที่ 3.9

$$R = 2R_c + \frac{\rho}{(d)(w)} L \quad (3.9)$$

โดยที่ R_c คือ ความต้านทานที่รอยต่อ(contact resistance)

R_s คือ ความต้านทานในชั้นฟิล์ม (resistance)

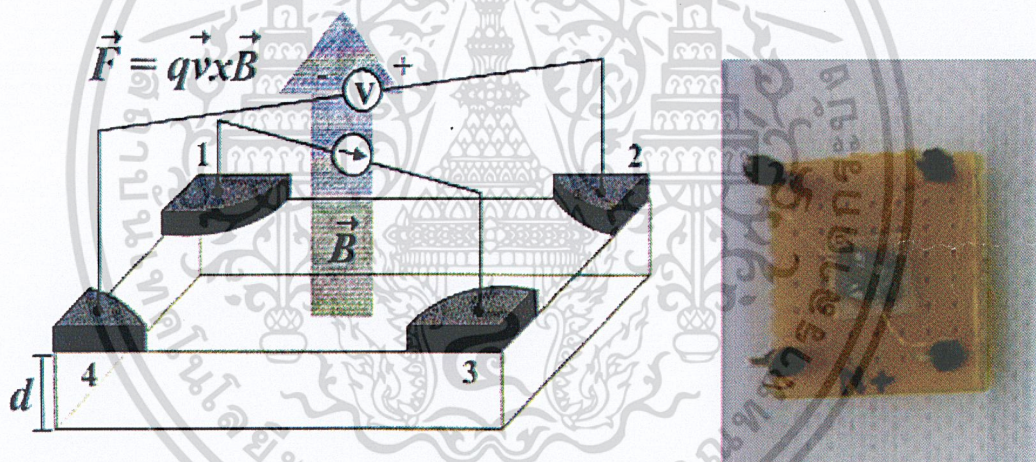
d คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม

W คือ ความกว้างของขั้วไฟฟ้า

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

3.1.2.3 ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

การหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะในการทดลองนี้จะใช้การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงลักษณะการวัด

นำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า และทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กมีทิศตั้งฉากกับชิ้นงานดังรูปที่ 3.7 โดยใช้ระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ ระบบวัดความต่างศักย์ และเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก

จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ นำมาหาความต้านทานจากกฎของโอห์มดังสมการที่ 3.10 , 3.11 และ 3.12 นำค่าความต้านทานที่ได้ ($R_{13} - R_{24} = \Delta R_{1324}$) คูณกับความหนาของฟิล์ม จากนั้นทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1324})$ กับค่าสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการเชิงเส้นที่ 3.16 ความชันกราฟมีค่าเท่ากับ R_H แทนค่า R_H ลงในสมการที่ 3.17 และ 3.18 เพื่อเป็นการหาค่าความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะตามลำดับ

ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก
$$R_{1324} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (3.10)$$

ขณะมีสนามแม่เหล็ก
$$R'_{1324} = \frac{V'_{24}}{I_{13}} \quad (3.11)$$

เมื่อ
$$V'_{24} = V_H + V_{24} \quad (3.12)$$

นำสมการที่ 3.11 ลบด้วยสมการที่ 3.10 จะได้

$$\Delta R_{1324} = R'_{1324} - R_{1324} = \frac{V'_{24} - V_{24}}{I_{13}} = \frac{V_H}{I_{13}} \quad (3.13)$$

จากสมการ
$$R_H = \left(\frac{V_H}{I}\right) \left(\frac{d}{B}\right) \quad (3.14)$$

โดยที่ V_H คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage)

R_H คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

B คือ ค่าสนามแม่เหล็ก (Tesla)

แทนสมการที่ 3.13 ลงสมการที่ 3.14 จะได้

$$R_H = (\Delta R_{1324}) \left(\frac{d}{B}\right) \quad (3.15)$$

จัดรูปให้สมการที่ 3.16 อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น โดยมีความชันเท่ากับ R_H

$$(d)(\Delta R_{1324}) = R_H B \quad (3.16)$$

ความหนาแน่นของพาหะสามารถหาได้จาก (เมื่อ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน)

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (3.17)$$

สภาพคล่องของพาหะสามารถหาได้จาก (สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากการทดลองที่ผ่านมา) นั่นคือ

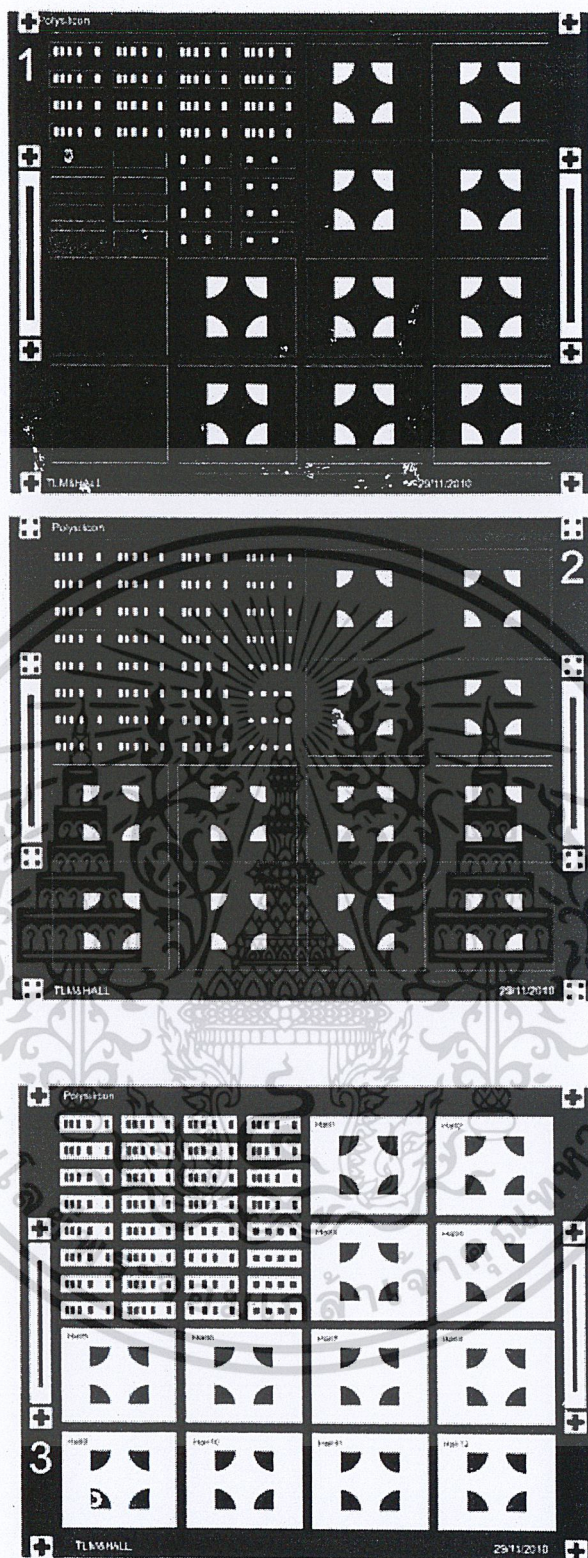
$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (3.18)$$

3.1.3 การออกแบบลวดลายที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอน

การออกแบบลวดลาย เป็นขั้นตอนแรกสำหรับกระบวนการสร้างทั้งหมด เนื่องจากในการออกแบบนั้น จะต้องเริ่มจากการศึกษาถึงข้อจำกัดต่างๆ ของลวดลายที่จะทำการออกแบบ รวมถึงข้อจำกัดในกระบวนการสร้างที่แตกต่างกันของแต่ละห้องปฏิบัติการ โดยหลังจากการออกแบบลวดลายแล้ว ยังจะต้องทำการจัดวางลวดลายให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเหมาะสมสำหรับในกระบวนการสร้าง และให้สามารถบรรจุอยู่ในพื้นที่ของฐานรองที่จำกัดได้

การออกแบบลวดลายเพื่อสร้างลงบนกระจกต้นแบบในโครงการนี้เลือกใช้โปรแกรม CorelDRAW Graphics Suite X5 โดยต้องทำการสร้างกระจกต้นแบบสามแผ่นได้แก่

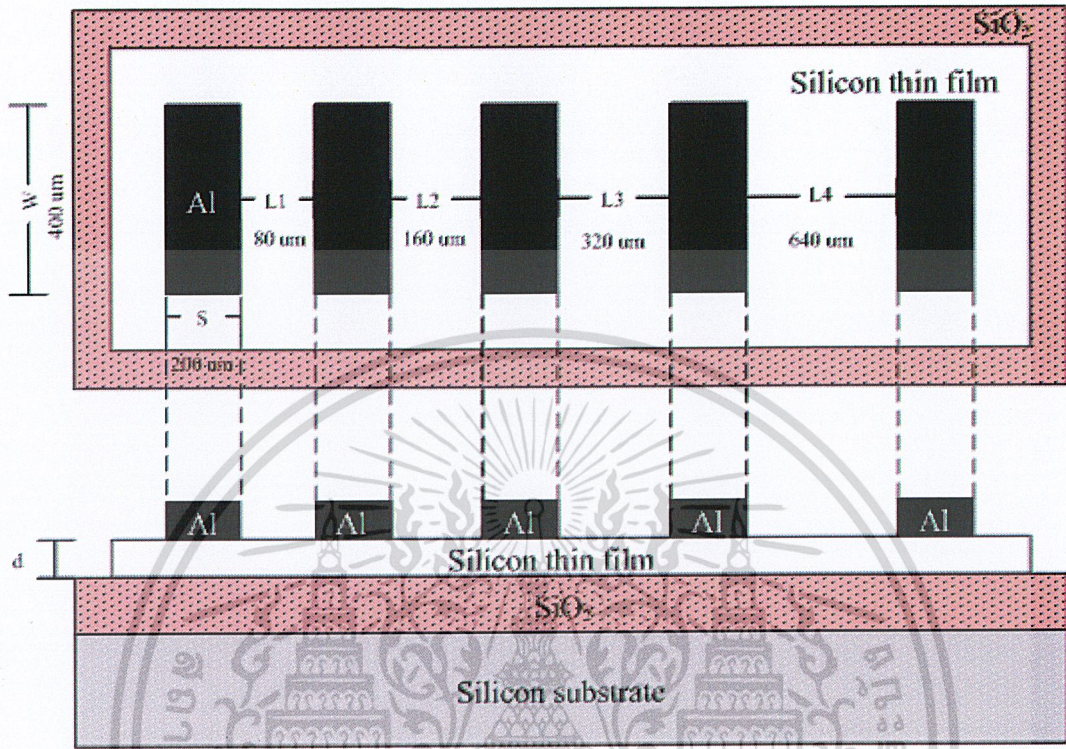
1. กระจกต้นแบบสำหรับเปิดช่องในการแพร่สารเจือ (diffusion mask) ใช้ในการเปิดช่องว่างในการแพร่สารเจือชนิด N และให้มีชั้นป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดการแพร่สารเจือในบริเวณที่ไม่ต้องการ
2. กระจกต้นแบบสำหรับชั้น Silicon (contact mask) ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างรอยสัมผัสระหว่างชั้นโลหะกับสารกึ่งตัวนำ
3. กระจกต้นแบบสำหรับใช้สร้างลวดลายของชั้นอลูมิเนียม (Al mask) เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 ลวดลายที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอน

3.1.3.1 การออกแบบลวดลายการวัดระยะการส่งผ่าน

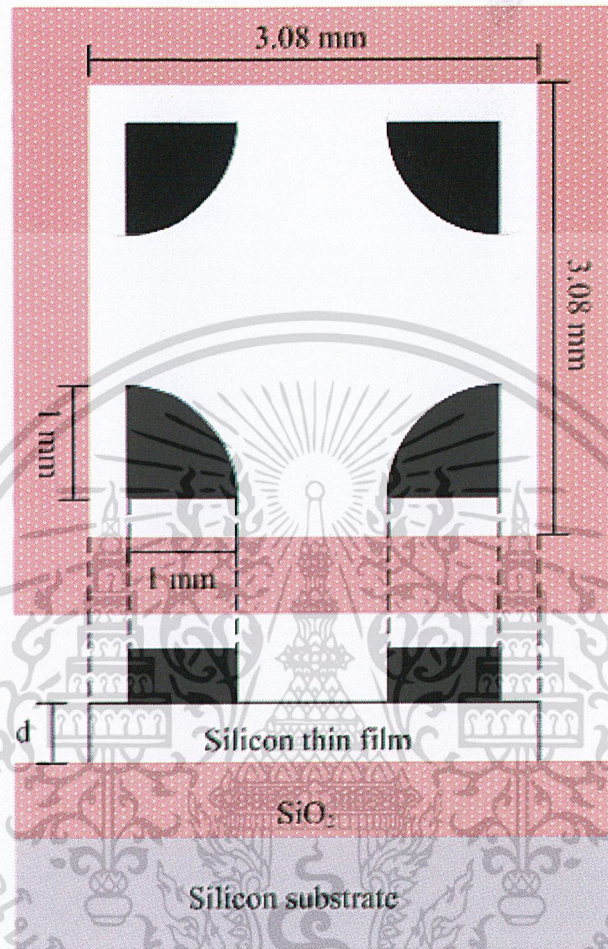
(transmission line method ; TLM)



รูปที่ 3.9 ลักษณะลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยระยะการส่งผ่าน

กำหนดให้ความหนาของฟิล์มบางซิลิคอนเท่ากับ d ความกว้างของขั้วไฟฟ้า (s) เท่ากับ $200 \mu\text{m}$ ความยาวของขั้วไฟฟ้า (w) เท่ากับ $400 \mu\text{m}$ โดยจะกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (L) มีค่า $L_1 < L_2 < L_3 < L_4$ เท่ากับ $80, 160, 320$ และ 640 ตามลำดับ รูปแบบและโครงสร้างของลวดลายแสดงดังรูปที่ 3.9

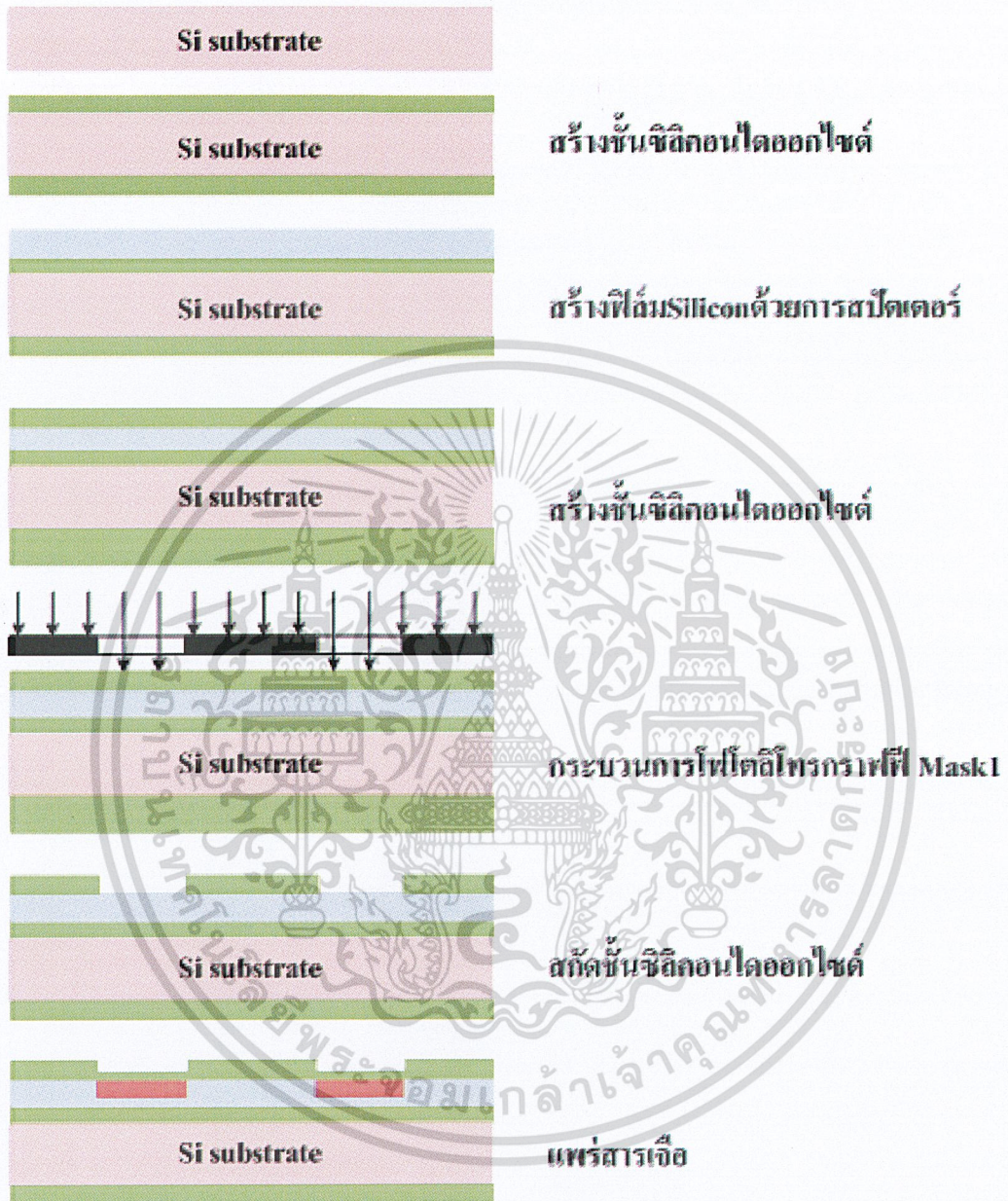
3.1.3.2 การออกแบบลวดลายการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)



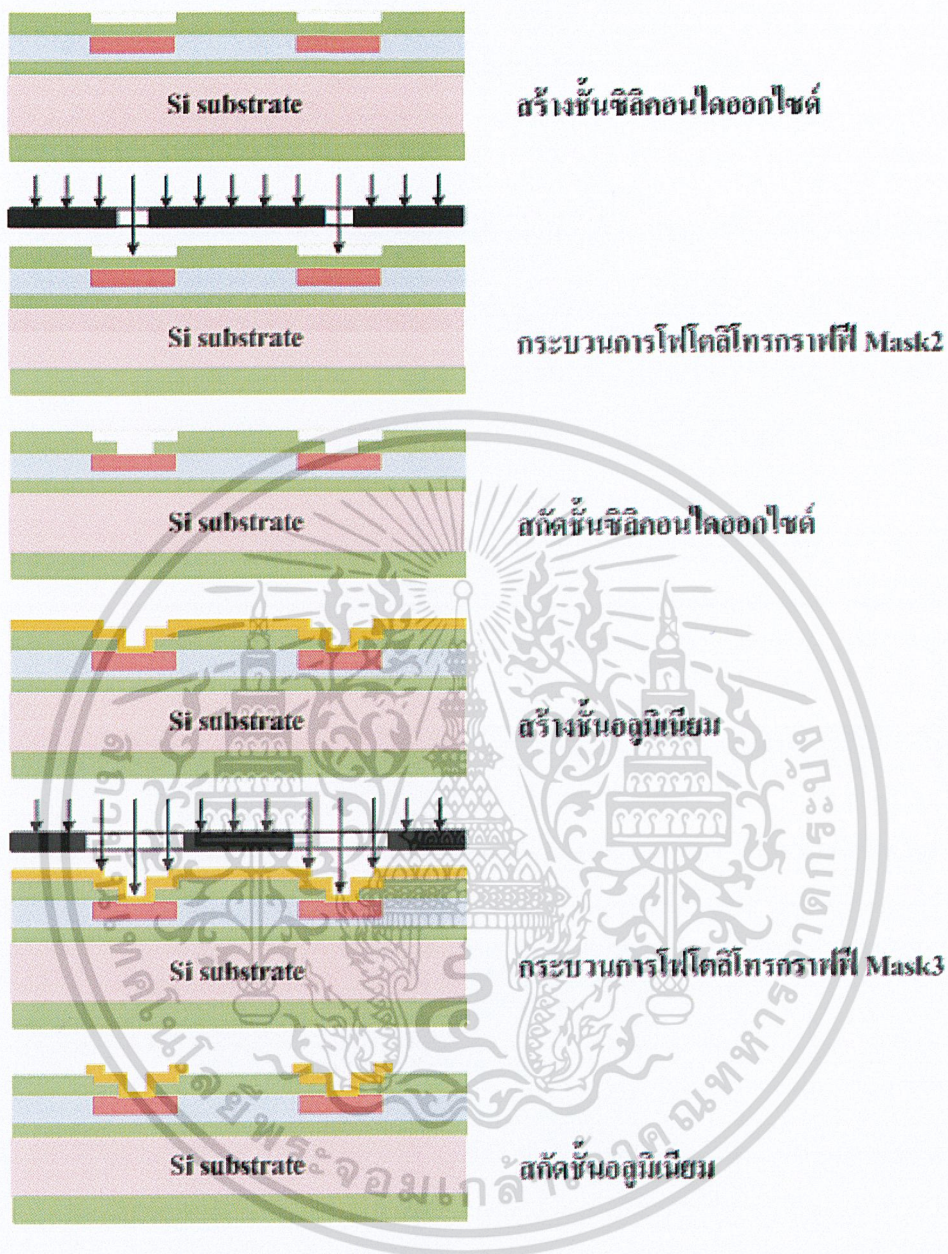
รูปที่ 3.10 ลักษณะลวดลายที่ใช้ในการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์

กำหนดให้ความหนาของฟิล์มบางซิลิคอนเท่ากับ d รัศมีของขั้วไฟฟ้ามีขนาดเท่ากับ 1 mm และขนาดของฟิล์มบางซิลิคอนเท่ากับ 3.08 x 3.08 mm

3.2 กระบวนการสร้าง



รูปที่ 3.11 ก แสดงกระบวนการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 ข แสดงกระบวนการสร้างฟิล์มบางซิลิคอนเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ต่อ)

กระบวนการสร้างชั้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนเริ่มต้น

1. กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน
2. ทำการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์โดยในที่นี่จะทำการสร้างโดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางซึ่งมีความหนา 1601 nm
3. กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือโดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 5000 อังสตรอม
4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี Mask 1 (Diffussion mask) เพื่อเปิดช่องว่างในการแพร่สารเจือลงบนชั้นฟิล์มบางซิลิคอน
5. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และทำการแพร่สารเจือโบรอนลงบนชั้นฟิล์มบางซิลิคอน
6. กระบวนการออกซิเดชันเพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
7. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี Mask 2 (Contact mask) เพื่อเปิดช่องว่างสำหรับสร้างขั้วโลหะ
8. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และทำการสร้างชั้นอลูมิเนียม
9. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี Mask 3 (Al mask) เพื่อสกัดชั้นของอลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นขั้วโลหะ

3.2.1 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์

กระบวนการสปัตเตอร์ได้ถูกค้นพบในปี 1852 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต กรูฟ (Sir William Robert Grove) และได้รับการพัฒนาต่อมาเป็นกระบวนการปลูกฟิล์มบางโดย แลงมัวร์ (Langmuir) การสปัตเตอร์เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยอาศัยการชนกระแทกของอนุภาคพลังงานสูง เพื่อถ่ายเทโมเมนตัมให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาและเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศลงบนฐานรองสารกึ่งตัวนำ กระบวนการนี้สามารถสร้างให้เกิดสถานะผิบบนรอยต่อของโลหะสารกึ่ง

ตัวนำได้ รวมไปถึงถึงสถานะเงื่อนไขขณะกำลังสปีดเตอร์ได้แก่ กำลังในการสปีดเตอร์ ความดันก๊าซอาร์กอน อุณหภูมิฐานรอง ระยะเวลาในการสปีดเตอร์ ล้วนส่งผลถึงลักษณะสมบัติของฟิล์มบางได้

ข้อดีของการสปีดเตอร์

1. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุโลหะและฉนวนได้
2. สามารถสร้างฟิล์มบางของวัสดุขูดหลอมเหลวสูงและต่ำได้
3. ควบคุมความสม่ำเสมอของฟิล์มบางได้ดี
4. สร้างชั้นอัลลอยได้ดี
5. ฟิล์มบางที่สร้างมีความบริสุทธิ์สูง

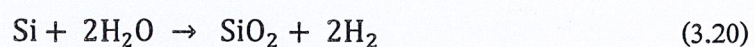
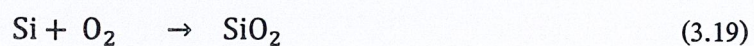
3.2.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีจุดประสงค์เพื่อทำการถ่ายแบบแผนของสิ่งประดิษฐ์ลงบนผิวของแผ่นผลึกชั้นตอนของกระบวนการ คือ

1. การสร้างกระจกแบบแผน (Photomask) ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวแบบสำหรับการถ่ายภาพแบบแผนลงบนผิวของแผ่นผลึก
2. การดำเนินการถ่ายภาพแบบแผนจากกระจกแบบแผนลงบนผิวของแผ่นผลึก โดยใช้สารไวแสงและกระบวนการถ่ายภาพ

3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอน ไดออกไซด์ (silicon dioxide) เป็นสารซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสงใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงราว 900 – 1300 องศาเซลเซียส สมการทางเคมีแสดงได้ดังนี้



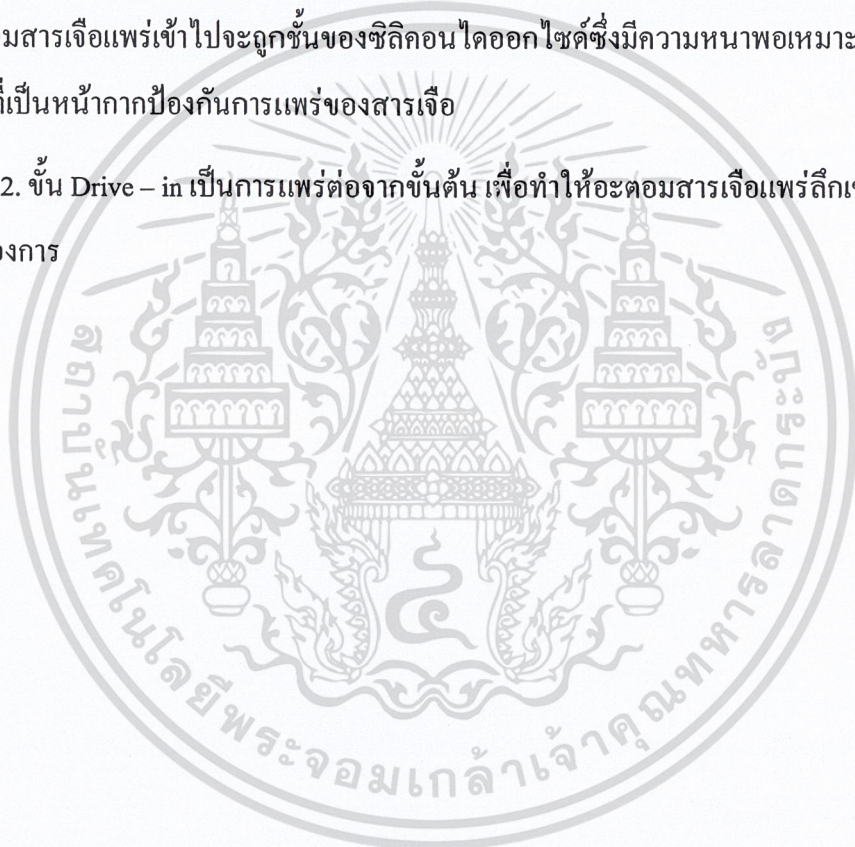
3.2.4 กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือในงานเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในปริมาณที่ต้องการ ในทางปฏิบัติ กระบวนการแพร่สารเจือแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนดังนี้

1. ขั้น Predeposition เป็นการแพร่ขั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ

ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ บริเวณใดของแผ่นผลึกซิลิคอนที่ไม่ต้องการให้อะตอมสารเจือแพร่เข้าไปจะถูกชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งมีความหนาพอเหมาะปิดอยู่เพื่อทำหน้าที่เป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่ของสารเจือ

2. ขั้น Drive – in เป็นการแพร่ต่อจากขั้นต้น เพื่อให้อะตอมสารเจือแพร่ลึกเข้าไปในผลึกตามที่ต้องการ



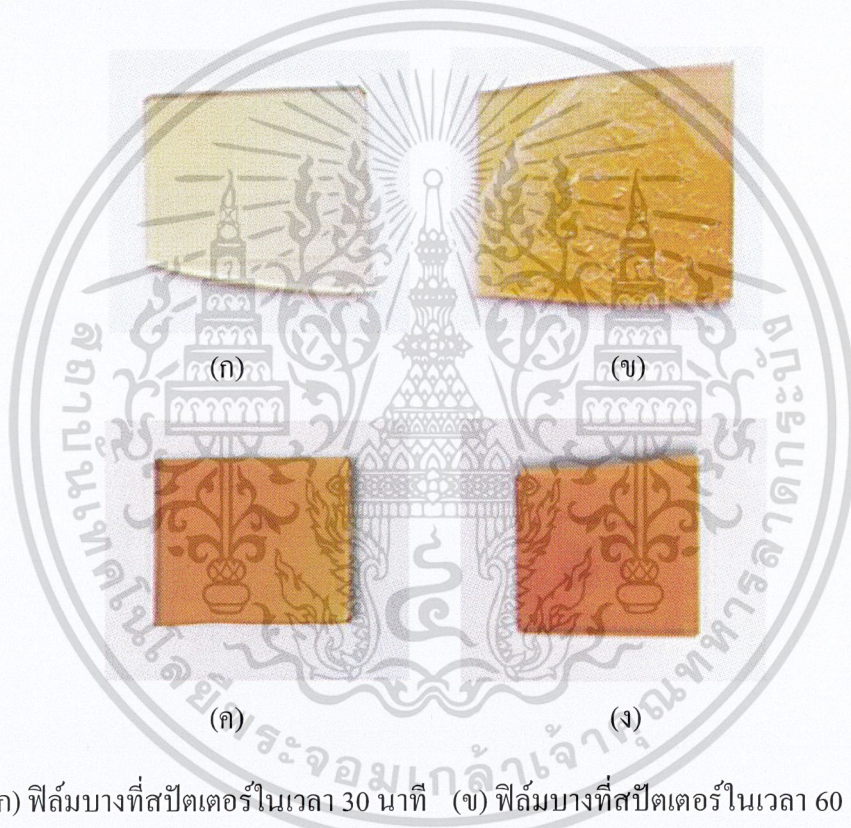
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอน โดยในการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนนี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

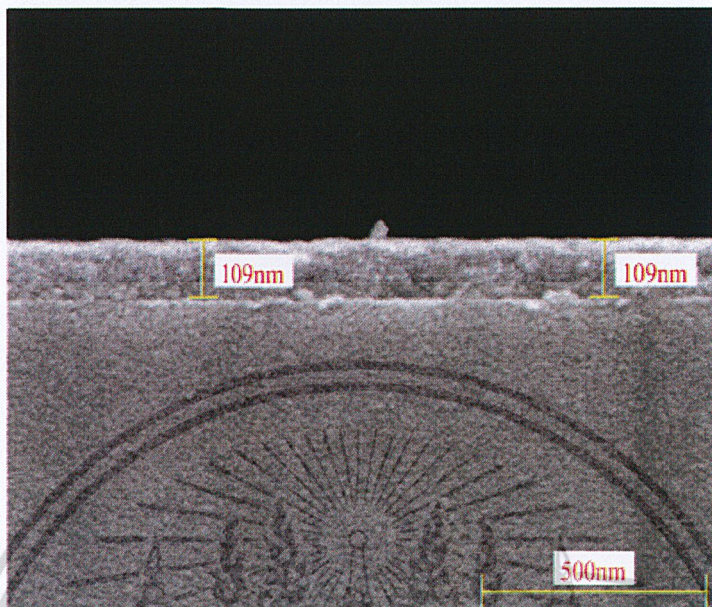
4.1.1 เปรียบเทียบสีของฟิล์มบางซิลิคอน



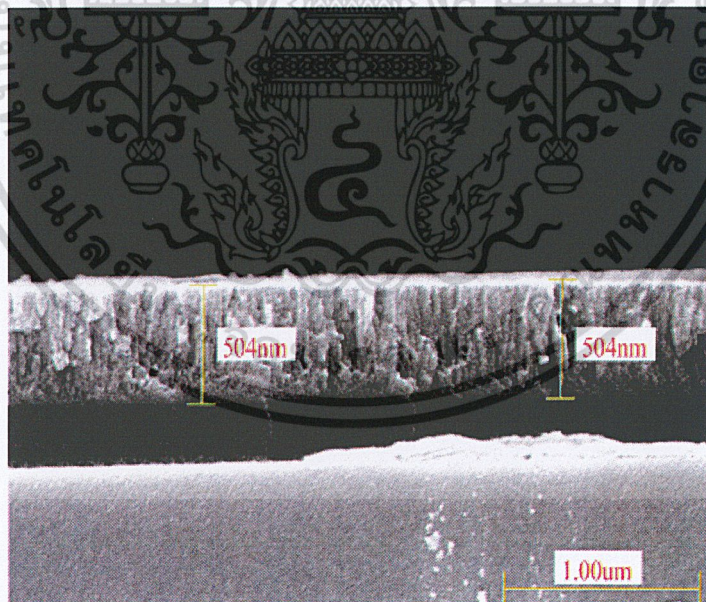
รูปที่ 4.1 (ก) ฟิล์มบางที่สปีดเตอร์ในเวลา 30 นาที (ข) ฟิล์มบางที่สปีดเตอร์ในเวลา 60 นาที
(ค) ฟิล์มบางที่สปีดเตอร์ในเวลา 240 นาที (ง) ฟิล์มบางที่สปีดเตอร์ในเวลา 360 นาที

จากรูปที่ 4.1 เป็นการสังเกตสีของฟิล์มบางพบว่า ฟิล์มบางซิลิคอนที่สปีดเตอร์ในเวลา 30 นาทีมีสีเหลืองอ่อน เพราะมีความบางมาก ส่วนฟิล์มบางซิลิคอนที่สปีดเตอร์ในเวลา 360 นาที สีของฟิล์มบางมีความเข้มมากขึ้น คือเป็นสีเหลืองเข้ม เพราะเวลาในการสปีดเตอร์เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มบางมีความหนามากขึ้น

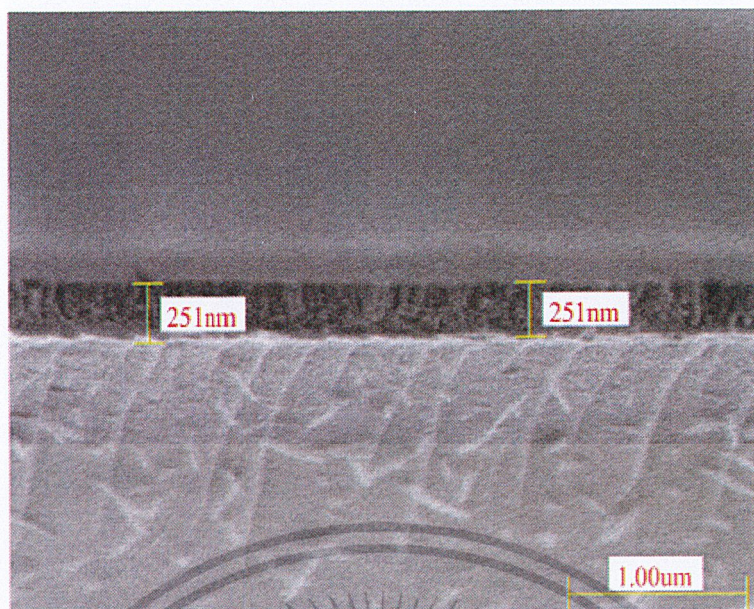
4.1.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบางซิคอนโดยใช้วิธี (Scanning Electron
Microscope : SEM)



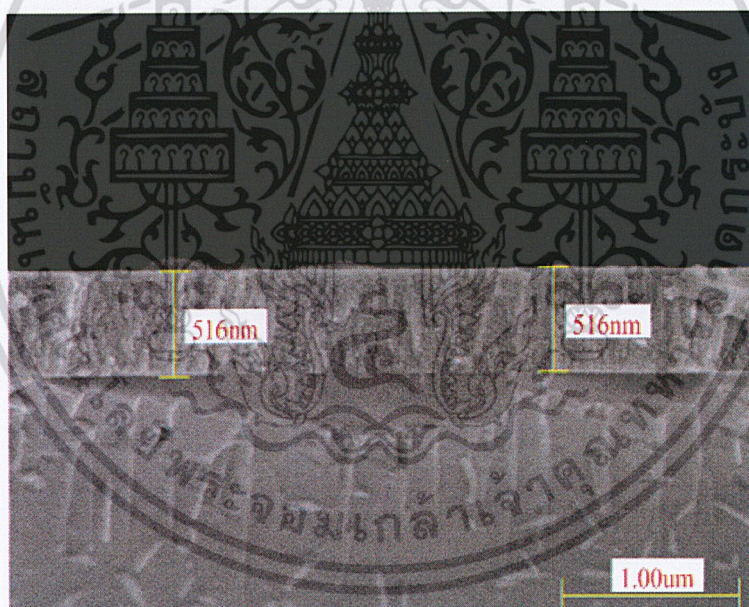
รูปที่ 4.2 ก ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 30 นาที



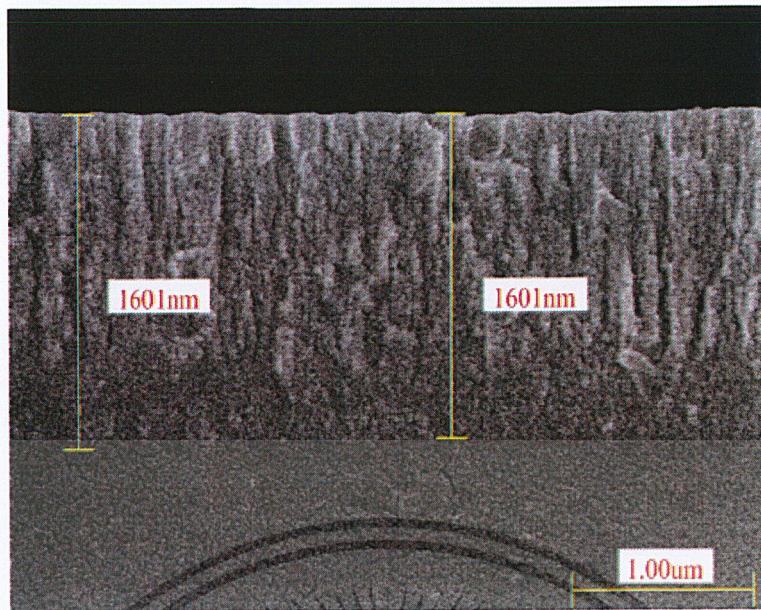
รูปที่ 4.2 ข ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 60 นาที



รูปที่ 4.2 ค ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 90 นาที

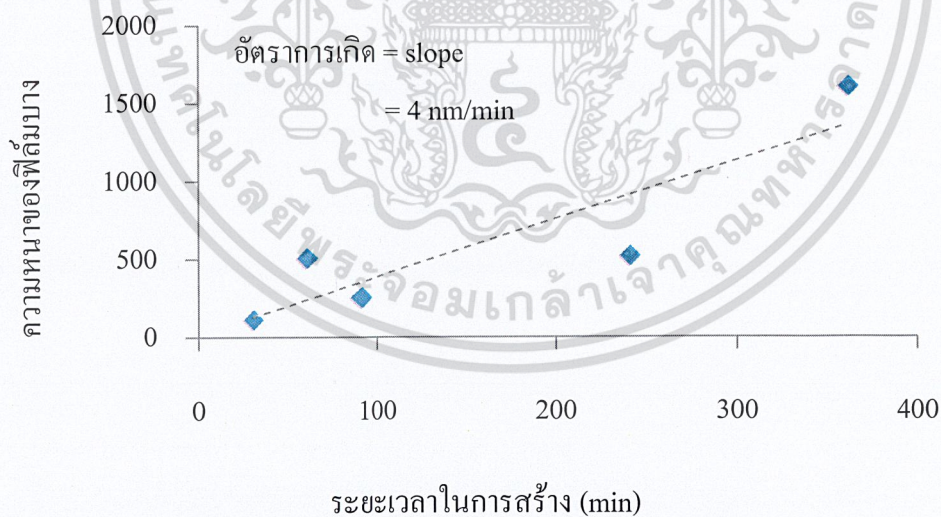


รูปที่ 4.2 ง ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 240 นาที



รูปที่ 4.2 จ ความหนาของฟิล์มบางที่สร้าง 360 นาที

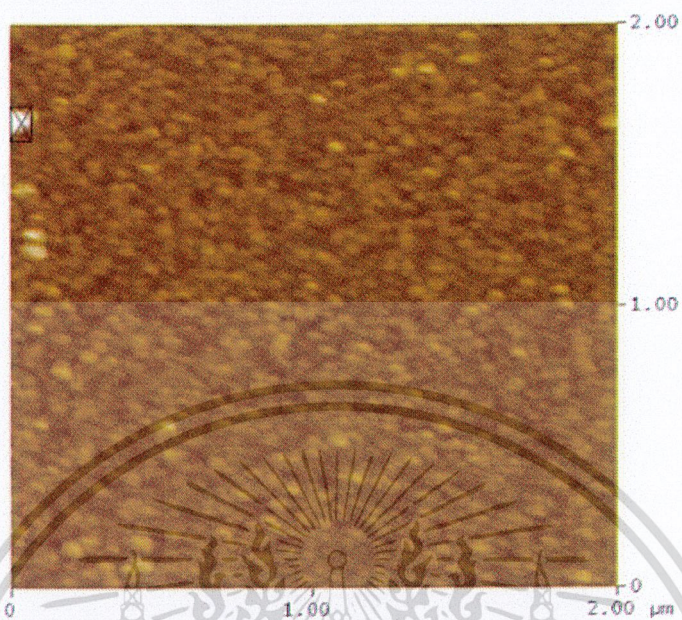
จากรูปที่ 4.2 แสดงความหนาของชั้นฟิล์มที่สร้างที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 240 และ 360 นาที พบว่าฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการสร้างน้อยจะมีความหนาของชั้นฟิล์มบางน้อยกว่าฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการสร้างที่มากกว่า



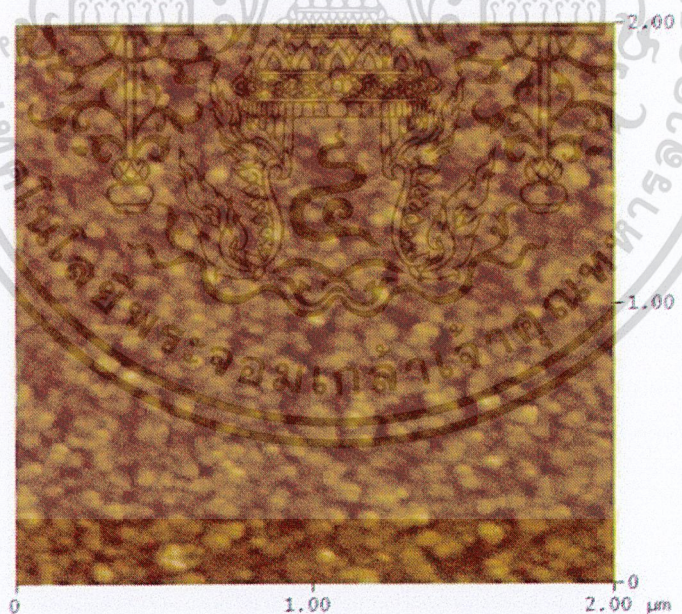
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสร้าง (min) กับ ความหนาของฟิล์มบาง (nm)

จากกราฟรูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสร้างกับความหนาของชั้นฟิล์มบาง สามารถหาอัตราการเกิดฟิล์มบางได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 4 nm/min

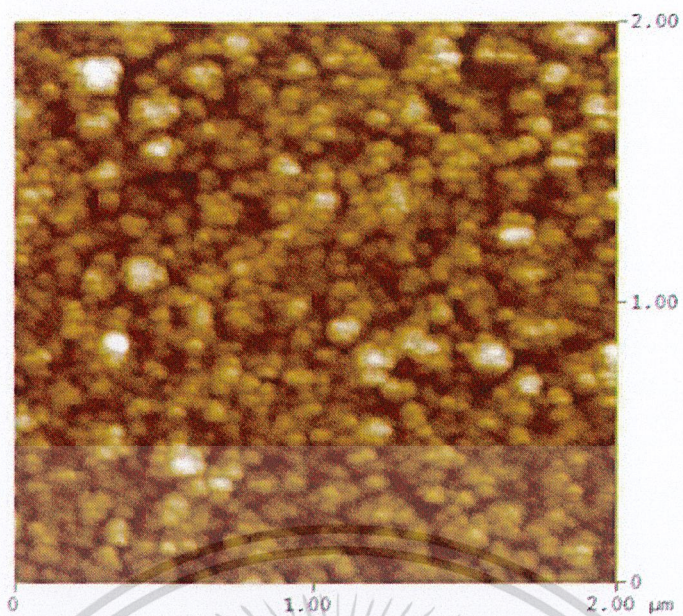
4.1.3 ตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM)



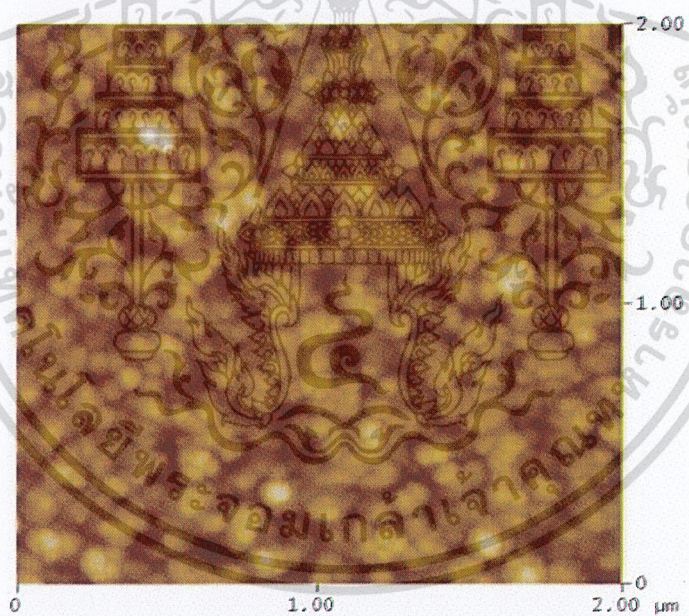
รูปที่ 4.4 ก แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที



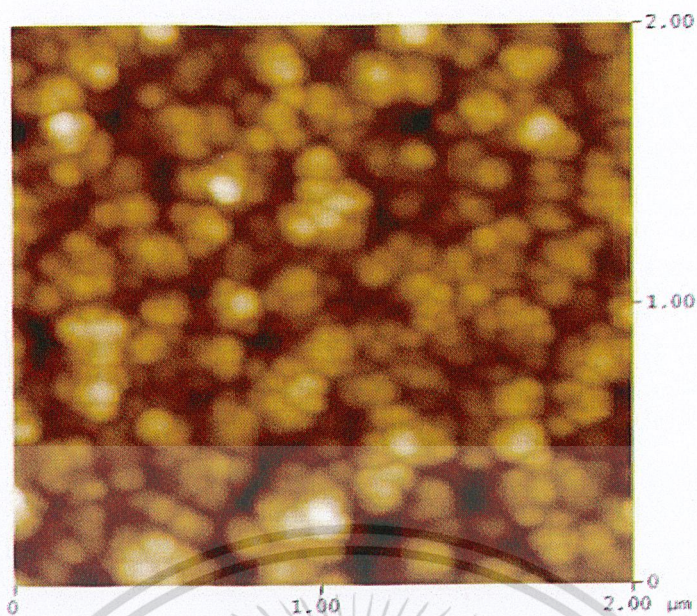
รูปที่ 4.4 ข แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 60 นาที



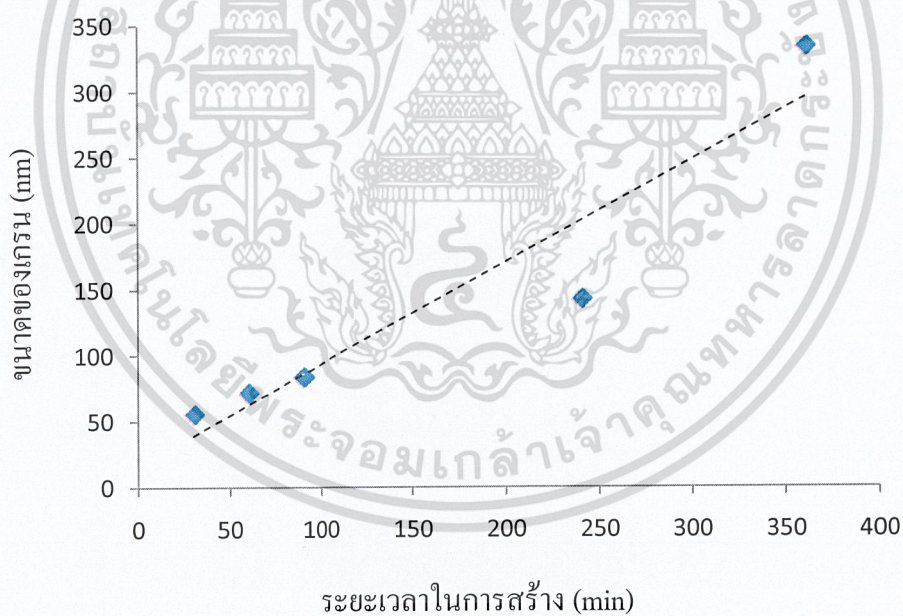
รูปที่ 4.4 ค แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างเวลา 90 นาที



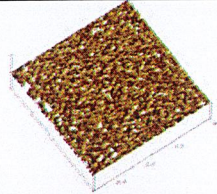
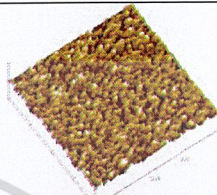
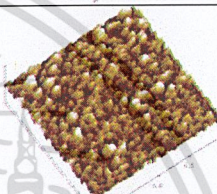
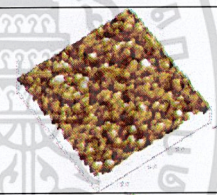
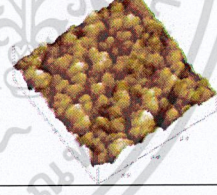
รูปที่ 4.4 ง แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างเวลา 240 นาที



รูปที่ 4.4 จ แสดงลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสร้าง (min) กับ ขนาดของเกรน (nm)

ชิ้นงาน	ระยะเวลา ในการสร้าง (min)	Silicon thinfilm roughness (nm)	ภาพพื้นผิวฟิล์มบาง (ด้านข้าง)
1	30	1.378	
2	60	2.713	
3	90	3.402	
4	240	3.475	
5	360	4.197	

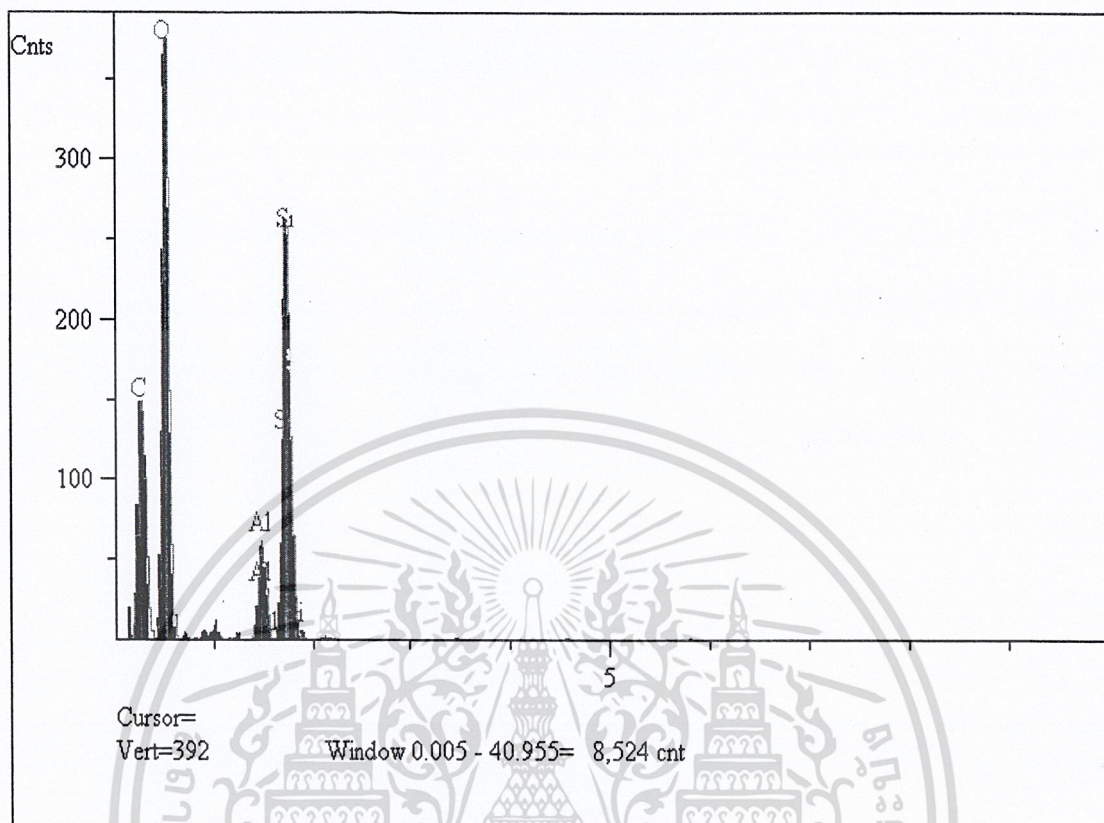
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบความสม่ำเสมอของฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างที่ระยะเวลาต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง Atomic Force Microscope

- จากภาพถ่ายพื้นผิวพบว่าฟิล์มบางซิลิคอนมีลักษณะของเกรนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อทำการสร้างที่เวลานานขึ้น

- จากค่า Ra ซึ่งระบุความสูงเฉลี่ยของยอดคลื่น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสร้างนานขึ้น

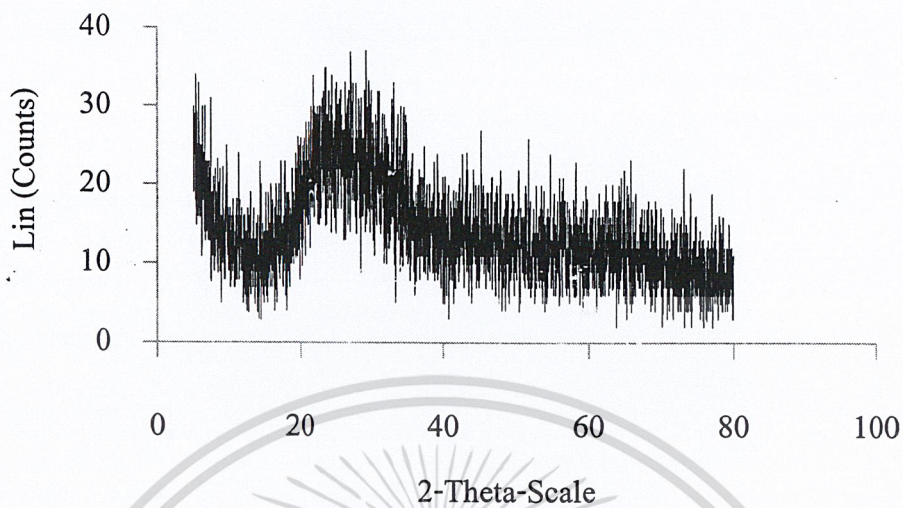
4.1.4 การตรวจสอบหองค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบางซิลิคอน



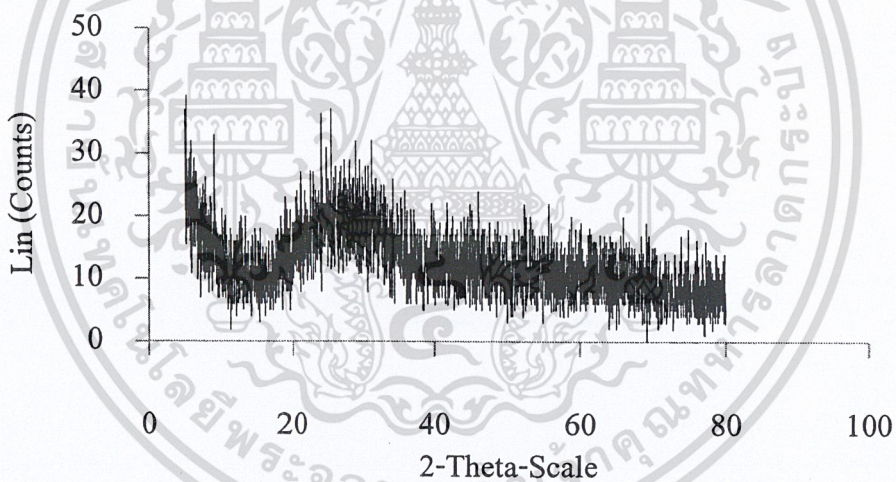
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงชนิดของธาตุที่อยู่บนฟิล์มบางซิลิคอนที่สร้างที่เวลา 60 นาที

ทำการตรวจสอบหองค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางที่สร้างที่เวลา 30 นาทีเมื่อนำไปทดสอบแล้วไม่สามารถตรวจสอบหองค์ประกอบธาตุได้ แต่เมื่อนำฟิล์มบางที่สร้างที่เวลา 60 นาทีมาทำการตรวจสอบพบ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) อะลูมิเนียม (Al) และซิลิคอน (Si) เป็นธาตุหลักๆที่อยู่บนฟิล์มบาง และคาดว่าเป็นธาตุที่อาจจะเป็นองค์ประกอบของฟิล์มบางซิลิคอน ส่วนธาตุอื่นๆที่เป็นส่วนประกอบอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างฟิล์มบาง

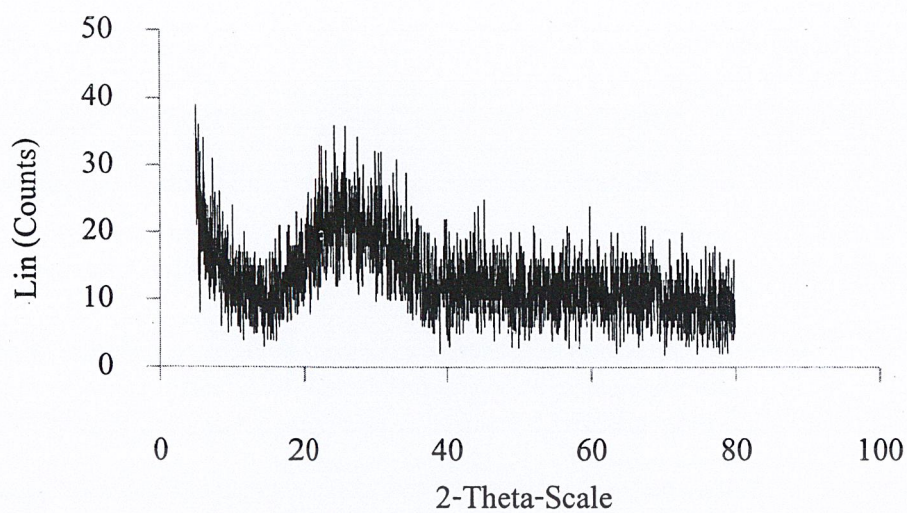
4.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางชนิดอน



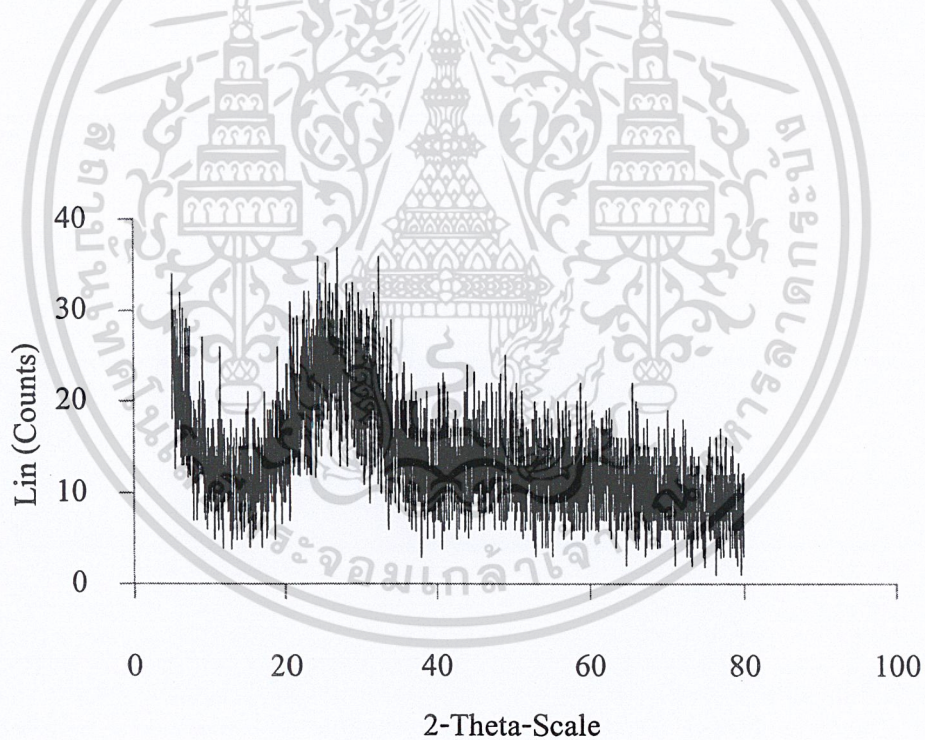
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 30 นาที



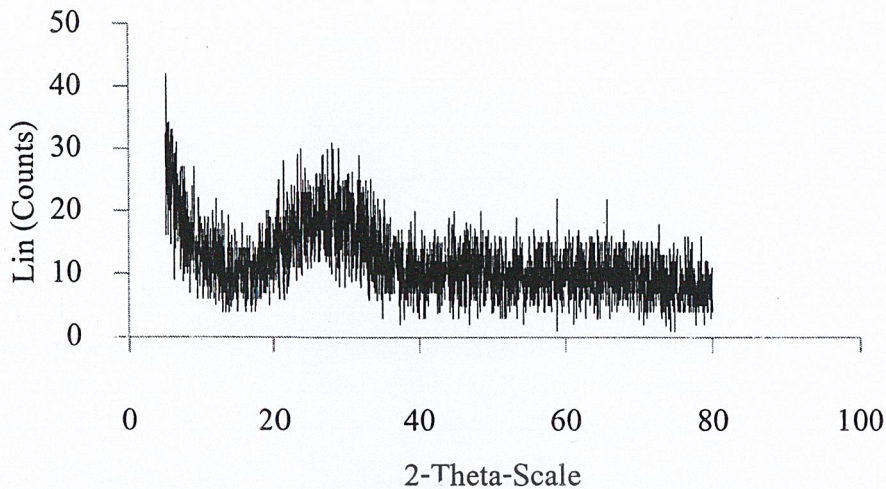
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 60 นาที



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 90 นาที



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 240 นาที



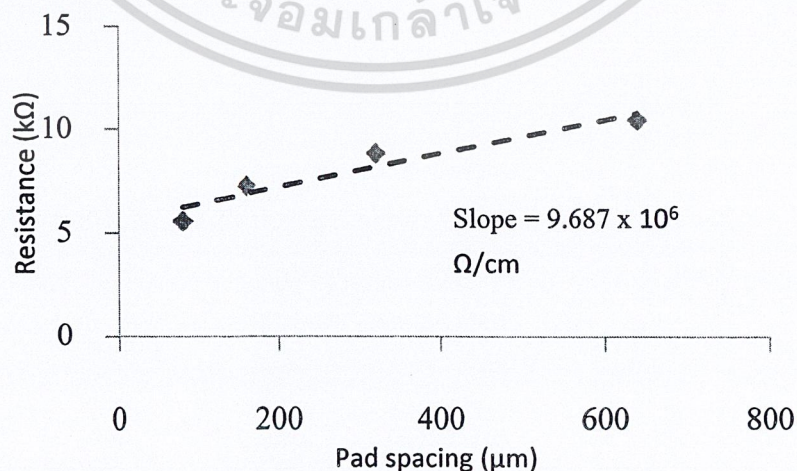
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลจากเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการสร้าง 360 นาที

จากกราฟที่ 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11 พบว่าไม่ปรากฏระนาบของผลึกที่ชัดเจนดังนั้นฟิล์มบางที่สร้างได้จึงมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส

4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

4.2.1 ตรวจสอบสภาพความต้านทานไฟฟ้าของ ฟิล์มบางชนิดคอน ที่การเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในกระบวนการสร้างถึงลวดลายที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านไฟฟ้า หรือลวดลายในการวัด TLM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะอะลูมิเนียมเพื่อสร้างให้เกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก ผลการทดลองปรากฏดังกราฟรูปที่ 4.6

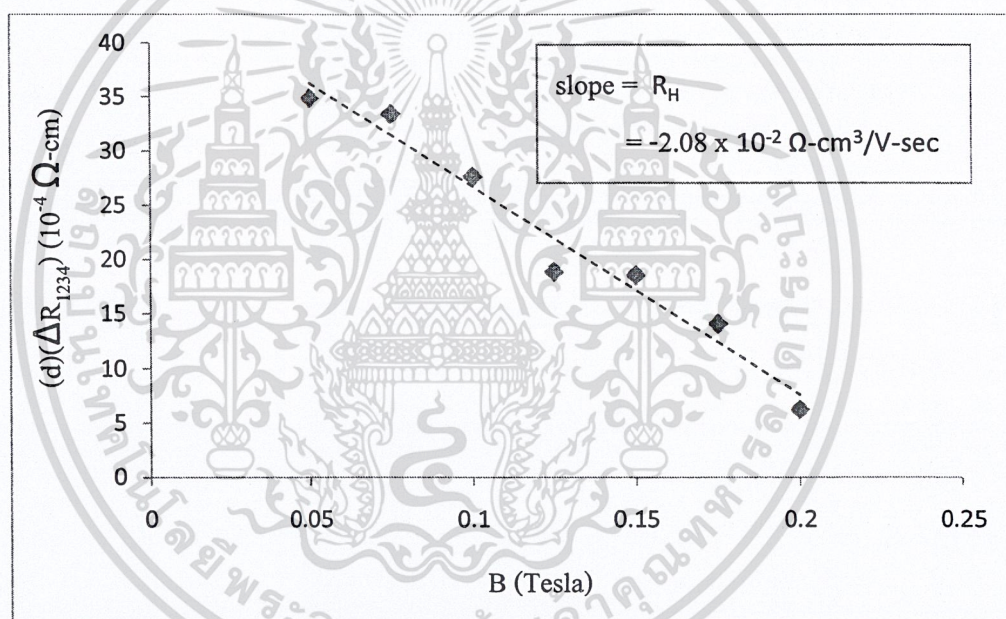


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.12 สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนได้เท่ากับ $6.2 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$

4.2.2 ตรวจสอบความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม

การหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะในการทดลองนี้จะใช้การวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์โดยทำการให้กระแสไฟฟ้าผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 mA ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉาก จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้นำมาคำนวณหาความต้านทานจากกฎของโอห์มนำค่าความต้านทานคูณด้วยความหนาของฟิล์มจากนั้นนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1234})$ กับค่าสนามแม่เหล็ก แสดงดังกราฟที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1234})$ กับค่าสนามแม่เหล็ก

จากกราฟที่ 4.13 ความชันของกราฟคือค่า R_H ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-2.08 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}^3/\text{V-sec}$ ค่า R_H สามารถนำมาคำนวณหาความหนาแน่นพาหะมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของพาหะมีค่าเท่ากับ $3.35 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนที่เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคอาร์เอฟสปีดเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการสร้าง 30, 60, 90, 240 และ 360 นาที โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการสร้าง โดยคุณสมบัติทางกายภาพเมื่อระยะเวลาในการสร้างเพิ่มมากขึ้น ขนาดเกรนใหญ่ขึ้น ฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD สังเกตผลที่ได้จากกราฟที่ระยะเวลาในการสร้างต่างๆ ลักษณะกราฟคล้ายคลึงกันคือไม่มีระนาบของผลึกที่ชัดเจนดังนั้น โครงสร้างของฟิล์มบางที่สร้างได้จึงมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส

ในการทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ทำการออกแบบเพื่อทำการทดสอบหาสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค TLM หาความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะด้วยเทคนิค Hall effect

ลวดลายซึ่งกำหนดให้มีค่า 80, 160, 320 และ 640 nm ตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นฟิล์มบางขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการสร้างซึ่งเลือกใช้ระยะเวลา 360 นาที ความหนาเท่ากับ 1601 nm จากนั้นทำการทดลองโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานจากกฎของโอห์ม ($V=IR$) ได้ค่า 5.59, 7.28, 8.83 และ 10.43 โอห์ม ตามลำดับนำค่าที่ได้นี้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ ρ/dW ดังนั้นจึงสามารถหาค่าสภาพต้านทาน (ρ) ได้ค่าเท่ากับ $6.2 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$

จากนั้นเป็นการทดสอบหาความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะ โดยเทคนิค Hall effect ในการออกแบบลวดลายกำหนดให้รัศมีของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1 mm ขนาดของฟิล์มบางเท่ากับ 3.08×3.08 mm การทดลองทำการให้กระแสไฟฟ้าผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 mA ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วก่อนและหลังให้สนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉาก จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจากกฎของโอห์มนำค่าความต้านทานคูณด้วยความหนาของฟิล์ม

จากนั้นนำไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(d)(\Delta R_{1234})$ ($10^2 \Omega\text{-cm}$) กับค่าสนามแม่เหล็ก ความชันของกราฟคือค่า R_H ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-2.08 \times 10^2 \Omega\text{-cm}^3/\text{V}\text{-sec}$ ค่า R_H สามารถนำมา คำนวณหาความหนาแน่นพาหะมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของพาหะมีค่าเท่ากับ $3.35 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ sec}^{-1}$



บรรณานุกรม

- [1] วิทยานิพนธ์ คุณอิสระ ศรีชนชัย เรื่องคุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงชนิดซีดกีย์ โดยมีสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส
- [2] วิทยานิพนธ์ คุณกุลวรางค์ นุตะมาน เรื่อง การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และ ลักษณะสมบัติของตัวตรวจจับแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเทอร์ดิเจ็คท
- [3] วิทยานิพนธ์ คุณสุรชาติ เมืองอ่ำ เรื่อง การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ
- [4] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ.”ลักษณะสมบัติของซีดกีย์แบริเออร์โฟโตไดโอดแบบเชิงราบบนซิลิคอนชนิดเอ็นที่ขึ้นกับความเข้มข้นสารเจือของฐานรอง”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 25 ฉบับที่ 4, หน้า 41-46, 2551
- [5] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ.”ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีกระแสแสงสูง โดยใช้ขั้วโลหะโปร่งใส”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 27 ฉบับที่ 1, 2553