



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาปรากฏการณ์สวิตช์ความต้านทานของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo
สำหรับหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มชนิดความต้านทาน

The study of resistive switching phenomena on Ti/ZnO/Mo structure for
resistive random access memory device (ReRAM)

ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาปรากฏการณ์สวิตช์ความต้านทานของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo

สำหรับหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มชนิดความต้านทาน

The study of resistive switching phenomena on Ti/ZnO/Mo structure for resistive random access memory device (ReRAM)

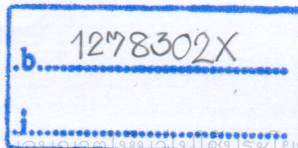
ดร.ราชศักดิ์ สักदानุภาพ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2557

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
๘4๒4๗
255๗



สาขา.....
เลขทะเบียน 142905
รับ.คืน.ปี - 6 ส.ย. 2559

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาปรากฏการณ์สวิตซ์ความต้านทานของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo สำหรับหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มชนิดความต้านทาน.....
 แหล่งเงิน โครงการวิจัยเงินรายได้ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล.....
 ประจำปีงบประมาณ..... 2557..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 150,000..... บาท
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557.....
 ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
 นายราชศักดิ์ ศักดานุภาพ (หัวหน้าโครงการ) สังกัดวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระ
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมสวิตซ์ความต้านทานของโครงสร้างโลหะ/ฉนวน/โลหะ ที่ประกอบไปด้วยชั้นของฟิล์มบาง ไททาเนียม (Ti) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า และโมลิบดีนัม (Mo) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง โดยโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo ถูกเตรียมลงบนกระจกโซดาแลมขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ โดยเทคนิค ดีซี/อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง และควบคุมความหนาของฟิล์ม Ti, ZnO และ Mo เท่ากับ 200nm, 50nm and 500nm ตามลำดับ ฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบสมบัติโครงสร้างโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมของสวิตซ์ความต้านทาน จากการวัดความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V curve) ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มโมลิบดีนัมมีระนาบโดดเด่นที่ (100) และฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีระนาบโดดเด่นที่ (002) ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์ม มีพื้นผิวที่เรียบโดยมีความขรุขระในระดับ 1.0 - 1.4 nm เซลล์สวิตซ์ความต้านทานมีพฤติกรรมแบบ unipolar resistive switching characteristic และมีประสิทธิภาพในการสวิตซ์ภายใน 150 รอบ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ความแตกต่างของสถานะความต้านทานสูง (HRS) และสถานะความต้านทานต่ำ มีค่าประมาณ 10^3 เท่า ค่าความต่างศักย์ในการเปลี่ยนสถานะจาก HRS ไป LRS อยู่ในช่วง 0.50-0.60V โดยใช้ค่ากระแส compliance เท่ากับ 10mA จากผลการทดลองสรุปได้ว่าโครงสร้างใหม่นี้ที่น่าเสถียรมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสวิตซ์ความต้านทานในอุปกรณ์หน่วยความจำชนิดไม่ลบเลือน

คำสำคัญ : สวิตซ์ความต้านทาน, หน่วยความจำชนิดไม่ลบเลือน, อาร์แรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: The study of resistive switching phenomena on Ti/ZnO/Mo structure for resistive random access memory device (RRAM)

Researcher: Mr.Rachsak Sakdanuphab.....

College of Data Storage Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

In this work, we study the resistive switching behavior of a new model metal/insulator/metal (MIM) junction. The MIM junction consists of titanium front electrode, zinc oxide insulation layer and molybdenum back electrode thin films. The Ti/ZnO/Mo structure was prepared on $3 \times 3 \text{ cm}^2$ soda lime glass substrates using dc magnetron sputtering for metal electrodes and rf magnetron sputtering for ZnO layer. The thicknesses of Ti, ZnO and Mo films were controlled at 200nm, 50nm and 500nm, respectively. The crystalline structure and microstructure of the films were characterized by X-ray diffraction and atomic force microscopy. The current-voltage (I-V) characteristics of the device cells were obtained by using dc voltage sweep mode. The XRD spectra of the devices shows Mo(100) and ZnO(002) preferred orientations. The Mo and ZnO film surfaces exhibit dense crystallized grains with the root mean square roughness (RMS) of 1.0 and 1.4 nm, respectively. The device cells behave a unipolar resistive switching characteristic with reversible, controllable and reliability within 150 cycles. The difference between high resistive state (HRS) and low resistive state (LRS) is about 10^3 times. A low operating voltage range of 0.50-0.60V is obtained for switching from HRS to LRS at a current compliance of 10mA. The new MIM structure was demonstrated and indicated a potential to use as nonvolatile memory application.

Keywords : resistive switching, nonvolatile memory, RRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. ศิริเดช บุญแสง คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล ที่เล็งเห็นถึงความสำคัญและให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และความเอาใจใส่ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง ที่ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหาเรื่องงานวิจัยมาโดยตลอด ตลอดจนขอขอบคุณบุคลากรของวิทยาลัย ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และสุดท้ายขอขอบคุณ ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก ที่อยู่เคียงข้าง เข้าใจ และเป็นกำลังใจในการทำงาน การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูลประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555



นายราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทบทวนวรรณกรรม.....	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	17
3.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธี DC/RF magnetron sputtering.....	19
3.3 การเคลือบฟิล์มบาง (Thin film deposition).....	20
3.4 การตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่าง.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโมลิบดีนัม (Mo).....	41
4.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO.....	42
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของชั้นโลหะ/ฉนวน/โลหะ.....	43
4.4 พฤติกรรมสวิตช์ความต้านทานของโครงสร้างโลหะ/ฉนวน/โลหะ.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	47
ประวัตินักวิจัย	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เจือไนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง Mo ด้วยวิธี DC magnetron sputtering.....	41
4.2 เจือไนในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ZnO ด้วยวิธี RF magnetron sputtering.....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนภาพการแบ่งประเภทของหน่วยความจำ.....	3
1.2 แผนภาพโครงสร้างหน่วยย่อยของ RRAM ที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุ.....	3
1.3 แบบจำลองโครงสร้าง crossbar memory สำหรับ RRAM.....	4
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของสวิตช์ความต้านทานแบบ	7
2.2 กระบวนการเกิดเส้นทางนำไฟฟ้าของ RRAM.....	10
2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิแบบ R_{LRS} และ R_{HRS}	12
2.4 สเปกตรัม Energy Dispersive X-ray ของโครงสร้างหน่วยความจำ Ag/ZnO:Mn/Pt.....	13
2.5 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ Pt/HfO ₂ /Au MIM RRAM.....	14
2.6 ประสิทธิภาพความทนทานของอุปกรณ์ Ti/ZrO ₂ /Pt จากการวัด sweeping dc voltage bias.....	14
2.7 แสดงความสัมพันธ์ I-V characteristics ของ Ag/GZO/ZnO/Pt memory devices.....	15
2.8 ภาพ SEM ของโครงสร้าง โลหะ/CuO/โลหะ ภายหลังจากการใส่ความต่างศักย์.....	16
2.9 แสดง I-V characteristics ของ Pt/cobalt oxide nanowire/Pt device.....	16
3.1 วัสดุรองรับกระจกโซดาหลาม.....	17
3.2 แผนภาพโต๊ะแอมแสดงการทำความสะอาดกระจกขึ้นงาน.....	18
3.3 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ.....	21
3.4 กระบวนการเกิดสปัตเตอร์ริง ขณะไอออนชนกับผิวเป้าเคลือบ.....	23
3.5 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....	24
3.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก.....	26
3.7 ขั้นตอนการก่อเกิดฟิล์ม.....	30
3.8 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม.....	31
3.9 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม.....	31
3.10 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ.....	34
3.11 เครื่อง AFM (Parks systems model XE100) และแผนภาพหลักการทำงาน.....	37
3.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	37
3.13 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในโครงผลึกตามเงื่อนไขของ Bragg's Law.....	38
3.14 a) X-ray diffraction b) Intensity peak.....	39
3.15 เครื่องวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์.....	40
4.1 ภาพ AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง Mo ที่เตรียมโดยวิธี DC magnetron sputtering.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2	ภาพ AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยเทคนิค RF magnetron sputtering.....	43
4.3	ภาพแสดงตัวอย่างผลการวัดความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิค Surface Profiler.....	43
4.4	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD spectra) ของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo.....	44
4.5	(a) คุณลักษณะของสวิตช์ความต้านทานจากการวัดกระแส-ความต่างศักย์ (I-V curve).....	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

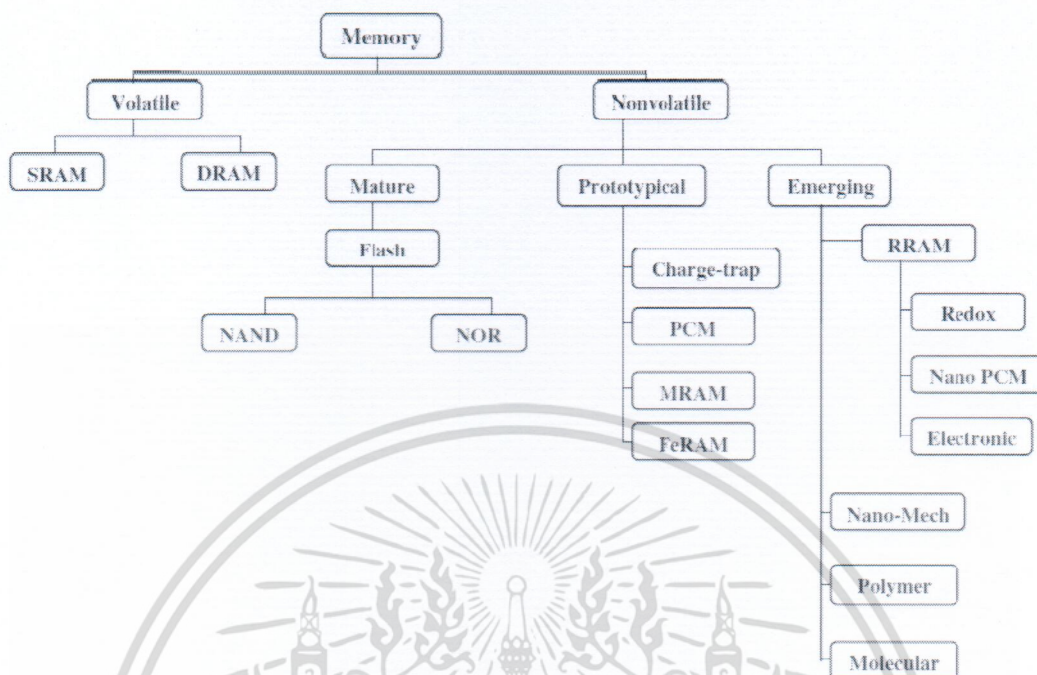
ปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และชิ้นส่วนประกอบในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่ก่อให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจต่อประเทศไทยอย่างมากโดยมีส่วนของปริมาณการผลิตรวมเป็นอันดับ 1 ของโลก มีการจ้างแรงงานกว่า 100,000 คน และการส่งออกมากกว่า 4 แสนล้านบาท (ที่มา HDDI) เทคโนโลยีบันทึกข้อมูลเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญกับกิจกรรมของมนุษย์มากขึ้น เนื่องจากข้อมูล ข่าวสาร เอกสารหรือแม้แต่หนังสือ ล้วนแล้วแต่ถูกจัดเก็บในรูปของข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์บนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลต่างๆ เช่น ฮาร์ดดิส, แฟลชซีดี-ดีวีดี, flash memory, memory card เป็นต้น ซึ่งในอนาคตรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดจะใช้ระบบที่เรียกว่า cloud computing system โดยมีความต้องการอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงจำนวนมาก

นอกจากนี้การพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำสำหรับอุปกรณ์พกพาเช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา (computer notebook), smart phone, และ tablet ก็มีความสำคัญเช่นกัน โดยต้องการหน่วยความจำที่รวดเร็วในการเขียนและอ่านข้อมูล ขนาดและน้ำหนักเบา รวมทั้งต้องการเนื้อที่ความจุมากขึ้น นักวิจัยทั่วโลกกำลังให้ความสนใจการพัฒนาหน่วยความจำเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่มชนิดไม่ลบเลือน หรือที่เรียกว่า non-volatile Random Access Memory สำหรับอุปกรณ์พกพาซึ่งสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้ถึงแม้ว่าไม่มีไฟเลี้ยงก็ตาม เพื่อมาทดแทน DRAM (Dynamic Random Access Memory) ซึ่งกำลังจะถึงขีดจำกัดด้านเทคโนโลยีในเวลาไม่ช้านี้ เราสามารถแบ่งประเภทหน่วยความจำเข้าถึงข้อมูลตามคุณลักษณะได้ดังรูปที่ 1 ตัวอย่างของหน่วยความจำชนิดไม่ลบเลือน ได้แก่ FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory) [1], MRAM (Magneto-resistive Random Access Memory) [2], PCM (Phase Change Memory) [3] และ RRAM (Resistive Random Access Memory) [4] หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Memristor สำหรับการแข่งขันของหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนสำหรับพัฒนาในยุคต่อไป ทั้ง MRAM และ FRAM ซึ่งใช้หลักการของ magnetic tunnel junction และการผันกลับของโพลาริเซชันของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกตามลำดับต่างก็พบข้อจำกัดในเรื่องของการลดขนาดให้เล็กลง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของแรมชนิดต่าง ๆ แล้วจะพบว่า RRAM เป็นแรมที่ได้รับความสนใจมากกว่าเนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนซึ่งประกอบไปด้วยชั้นรอยต่อของ โลหะ/ฉนวน/โลหะ, กินไฟน้อย, สามารถขยายขนาดเพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ง่าย (scalability), ทำงานได้รวดเร็วและเข้ากันได้ดีกับเทคโนโลยี Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) [5] โดยในปี 2008 HP ได้สร้างต้นแบบ Memristor ในระดับห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางานของ RRAM ใช้คุณสมบัติของสวิตช์ความต้านทาน (Resistive Switching) ปรากฏการณ์สวิตช์ความต้านทาน (resistive switching) ถูกค้นพบโดย Hickmott ในปี 1962 จากวัสดุที่เป็น binary oxides ได้มีการค้นพบพฤติกรรม hysteretic resistive switching ภายใต้การจ่ายสนามไฟฟ้ากับวัสดุต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นในช่วงแรกในปี 1970s ถึง 1980s งานวิจัยส่วนใหญ่ได้มุ่งเป้าไปยังการอธิบายกลไกเกิดปรากฏการณ์สวิตช์ความต้านทาน ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นักวิจัยจึงพบว่าพฤติกรรมสวิตช์ความต้านทานน่าจะมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์เป็นหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนในช่วงปลายปี 1990s และได้นำไปสู่การวิจัยที่เพิ่มมากขึ้น งานวิจัยด้านนี้กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสมบัติ scaling, operating และ processing หลักการทํางานของ RRAM จะใช้การใส่ความต่างศักย์เข้าไปที่ขั้วโลหะของรอยต่อ เพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานของชั้นฉนวนซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อกําหนดสถานะในการเก็บข้อมูล (Reset: High resistance และ Set: Low resistance) เซลล์หรือโครงสร้างส่วนใหญ่ของ RRAM มีลักษณะเหมือนกับตัวเก็บประจุ MIM ดังรูป 2 ซึ่ง M แทนด้วยโลหะขั้วไฟฟ้า และ I แทนด้วยฉนวน (Insulator) หรือชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ประกบด้วยขั้วไฟฟ้า เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงได้มีการนำเสนอสถาปัตยกรรมที่เรียกว่า crossbar memory ซึ่งให้ความหนาแน่นสูงสุดและง่ายต่อการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ดังรูปที่ 3 แต่ละจุดระหว่าง Word line และ Bit line คือเซลล์ที่ใช้เก็บข้อมูล ดังนั้นขนาดของเซลล์สำหรับหน่วยความจำสามารถลดลงได้ถึงในระดับนาโนสเกลโดยใช้เส้นใยนาโนเป็น crossbar รวมทั้งลักษณะของโครงสร้างนี้ยังมีศักยภาพในการสร้างหน่วยความจำแบบสามมิติโดยใช้ multilevel stack ของ Word line และ Bit line ถึงแม้ว่า RRAM ได้รับความสนใจจากนักวิจัยและตลาดดังจะเห็นได้จากจำนวนงานวิจัยที่มากมาย แต่ความเข้าใจในกลไกของการเกิดพฤติกรรมเปลี่ยนสถานะความต้านทาน (resistive switching) ยังคงเป็นที่ถกเถียงกัน พฤติกรรมเปลี่ยนสถานะความต้านทานที่แตกต่างกัน เช่น unipolar และ bipolar, แบบจำลองการเปลี่ยนสถานะ เช่น filament model, trap controlled model, interface barrier model และ Mott transition ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับการวิจัย RRAM ทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

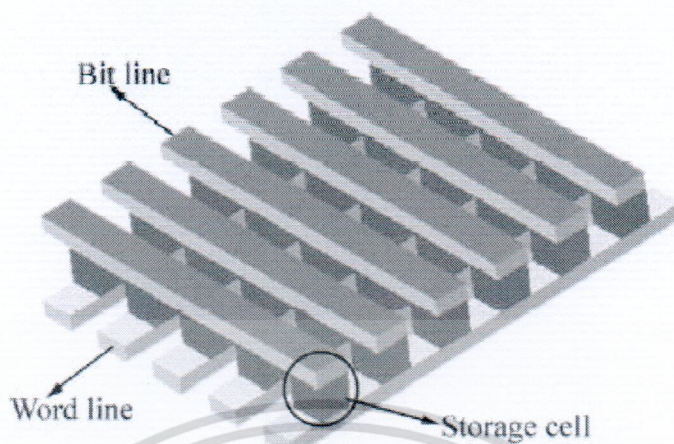


รูปที่ 1.1 แผนภาพการแบ่งประเภทของหน่วยความจำ SRAM: Static random access memory, DRAM: Dynamic random access memory, PCM: Phase change memory, MRAM: Magnetic random access memory, FeRAM: Ferroelectric random access memory, and RRAM: Resistive random access memory. [6]



รูปที่ 1.2 แผนภาพโครงสร้างหน่วยย่อยของ RRAM ที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยชั้นโลหะ/ฉนวน/โลหะ (MIM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 แบบจำลองโครงสร้าง crossbar memory สำหรับ RRAM โดยจุดตัดระหว่าง Word line และ Bit line คือเซลล์ที่ใช้เก็บข้อมูล

ดังนั้นจึงมีความต้องการพัฒนาหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (nonvolatile memory) ที่ความเร็วสูง ความจุมากขึ้น และกินไฟต่ำสำหรับอุตสาหกรรมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ตลาดของหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนเติบโตอย่างรวดเร็วในตลาดของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา หน่วยความจำแบบไม่ลบเลือนดั้งเดิมที่ใช้สำหรับอุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบพกพา คือ Flash memory ซึ่งมีความจุมากและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม Flash memory ก็ยังมีข้อเสียหลายอย่าง เช่น ความทนทานต่ำ ความเร็วต่ำ และใช้ความต่างศักย์สูงในการดำเนินการเขียน อีกทั้งยังเข้าใกล้ข้อจำกัดในเรื่องการเพิ่มความจุต่อพื้นที่ (physical scaling limit) ดังนั้นจึงจะต้องมีวัสดุใหม่และสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ใหม่ที่จะเข้ามาแก้ปัญหา

สำหรับงานวิจัยขั้นพินิล์มที่เป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณลักษณะของสวิตช์ความต้านทาน คือ ชั้นฉนวนที่มีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ (Metal oxide) เช่น ZnO, ZrO₂, TiO₂, NiO, Al₂O₃, SrZrO₃, BaTiO₃, และ HfO_x โดยในงานวิจัยจะมุ่งเน้นศึกษาด้านวัสดุศาสตร์ของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงๆ ซึ่งจะสามารถเก็บข้อมูลได้เสถียรและการศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เช่น Ti, Pt, Au และ TiN ที่เหมาะสมกับวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิด รวมทั้งศึกษากลไกการเกิดคุณสมบัติ Resistive Switching เพื่อการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเงื่อนไขในกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้าง Ti/ZnO/Mo โดยวิธีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืง
2. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้าง สมบัติของพื้นผิวของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo
3. เพื่อศึกษาสมบัติสวิตช์ความต้านทานของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo จากการวัดทางไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การประดิษฐ์โครงสร้างของ โลหะ/ลวดโลหะออกไซด์นาโน/โลหะ ลงบนบนแผ่นรองรับ กระจก ซิเดลาตาม (SLG)

1. ศึกษาเงื่อนไขในกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง Ti, ZnO และ Mo โดยวิธีแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงได้แก่ กำลังไฟฟ้า ความดันของแก๊ส Ar และอุณหภูมิของแผ่นรองรับ
2. ศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี สมบัติพื้นผิว และสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo
3. ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์ของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo สำหรับใช้เป็นหน่วยความจำ เข้าถึงแบบสุ่มชนิดความต้านทาน RRAM

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกออกได้เป็น

1. ตัดและล้างทำความสะอาดแผ่นรองรับ กระจกซิเดลาตาม (SLG) ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ โดยวิธีมาตรฐาน
2. เคลือบฟิล์มบาง โมลิบดีนัม (Mo) ด้วยเทคนิค DC magnetron sputtering ความหนาประมาณ 200-500 nm สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง (Bottom Electrode)
3. เคลือบฟิล์มบาง ZnO ด้วยเทคนิค RF magnetron sputtering ความหนาประมาณ 50-100 nm สำหรับเป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า (Insulator)
4. เคลือบฟิล์มบาง Ti ด้วยเทคนิค DC magnetron sputtering ความหนาประมาณ 200-400 nm ผ่านหน้ากาก (mask) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน (Top Electrode) และแบ่งเซลล์ออกเป็นเซลล์ย่อย
5. ทำการตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction
6. สรุปความก้าวหน้าและเขียนรายงานครั้งที่ 1
7. ทำการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบาง Mo และ ZnO ด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการตรวจสอบภาคตัดขวางของเซลล์สวิตช์ความต้านทานด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)
9. เตรียมเซลล์สวิตช์ความต้านทานด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน
10. ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้ากับเซลล์สวิตช์ความต้านทานที่สร้างขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์สวิตช์ความต้านทาน
11. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2 และเขียนบทความเพื่อเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติและบทความตีพิมพ์เผยแพร่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านวัสดุศาสตร์และอุปกรณ์ Resistive switching สำหรับใช้ใน RRAM
- 1.5.2 พัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลให้กับประเทศ
- 1.5.3 พัฒนาบุคลากรและผลิตบัณฑิตในระดับปริญญาโท/เอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

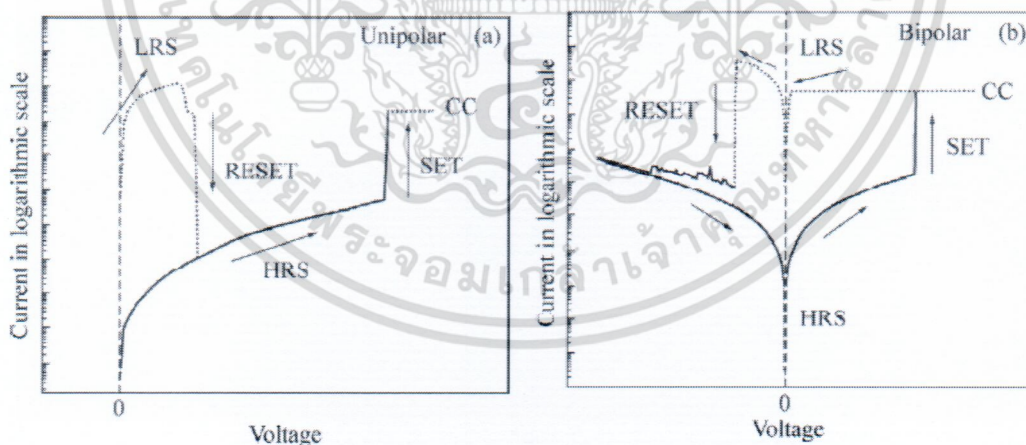
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.1.1 ประเภทของสวิตช์ความต้านทาน (Classification of resistive switching)

ลักษณะพื้นฐานของ RRAM จะประกอบไปด้วยสถานะความต้านทานที่แตกต่างกันสองสถานะ ได้แก่ สถานะความต้านทานสูง (high resistance state: HRS) และสถานะความต้านทานต่ำ (low resistance state: LRS) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะกลับไปมาได้โดยการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า โดยปกติ กระบวนการเปลี่ยนความต้านทานค่าความต้านทานของ RRAM จากสถานะ HRS ไปเป็นสถานะ LRS เราเรียกว่า “SET” process ส่วนกระบวนการเปลี่ยนกลับจากสถานะ LRS ไปยังสถานะ HRS เราเรียกว่า “RESET” โดยจะสามารถคงสถานะความต้านทานอยู่ได้ภายหลังจากการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดลักษณะการไม่ลบเลือนของสถานะใน RRAM ค่าความต้านทานของสถานะ HRS และ LRS สามารถอ่านได้ด้วย ความต่างศักย์เพียงเล็กน้อยและไม่มีผลกับสถานะความต้านทาน เนื่องจากความสัมพันธ์ของเชิงขั้วทางไฟฟ้า (electrical polarity) ระหว่างกระบวนการ SET และ RESET ทำให้สามารถแบ่งพฤติกรรมของสวิตช์ความต้านทานได้เป็นสองประเภท ได้แก่ แบบ unipolar และแบบ bipolar ซึ่งมีความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ (I-V characteristic) ที่แตกต่างกันดังรูป 4



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของสวิตช์ความต้านทานแบบ unipolar และแบบ bipolar บนกราฟ semilogarithmic scale (ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วงหลักโวลต์ และ กระแส compliance (CC) ทำหน้าที่ป้องกันการ breakdown ของ dielectric)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ RRAM แบบ unipolar ลักษณะการเกิดสวิตช์ความต้านทานไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางการใส่ความต่างศักย์ดังรูปที่ 2.1(a) ซึ่งแสดง I-V curve ของสวิตช์ความต้านทานแบบ unipolar ใน logarithmic scale จะเห็นว่าอุปกรณ์จะเปลี่ยนสถานะจาก HRS ไปยัง LRS ที่ความต่างศักย์สูง (V_{SET}) ต่อมาระบบจะกลับสู่สถานะความต้านทานสูง (HRS) ที่ความต่างศักย์ (V_{RESET}) ซึ่งต่ำกว่าความต่างศักย์ V_{SET} ในกระบวนการ SET กระแส compliance (CC) จะใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด breakdown ขณะที่ในกระบวนการ RESET ไม่จำเป็นต้องใส่กระแส CC ลักษณะของ I-V curve แบบ unipolar ดังรูปที่ 2.1(b) จะเกิดกับโครงสร้างที่สามารถตรรกะของอุปกรณ์ความหมายก็คือ วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าด้านบนและล่างเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับ binary oxides เช่น Pt/TiO₂/Pt, Pt/ZnO/Pt, Pt/NiO/Pt และ Al/ZrO₂/Al กลไกการเกิดสวิตช์ของ RRAM แบบ unipolar อธิบายได้ด้วยการเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้า (conducting filament) ภายใต้การกระตุ้นด้วยความต่างศักย์ของอุปกรณ์ไปยังสถานะ LRS และผลกระทบของ Joule heating ที่ทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้ากลับไปเป็นสถานะ HRS เนื่องจากผลกระทบของ Joule heating ไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์จึงแสดงลักษณะของสวิตช์แบบ unipolar โดย Chang และคณะ ได้ทดลองศึกษาลักษณะของสวิตช์ความต้านทานในฟิล์ม NiO ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และได้อธิบายกลไกการควบคุมผลกระทบจาก Joule heating และเสถียรภาพของเส้นทางการนำไฟฟ้าโดยปัจจัยการแข่งขันกันของ Joule heating และ thermal dissipation ในทางตรงกันข้าม ทิศทางการเปลี่ยนสถานะความต้านทานของ RRAM แบบ bipolar จะขึ้นอยู่กับทิศทางการใส่ศักย์ไฟฟ้าในอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.1(b) โดย ทิศทางของศักย์ไฟฟ้า V_{RESET} จะตรงข้ามกับทิศทางของศักย์ไฟฟ้า V_{SET} และสถานะ LRS (HRS) จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้า โครงสร้างของอุปกรณ์ RRAM ประเภทนี้โดยปกติเป็นโครงสร้างที่ไม่สมมาตร เช่นวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าคนละชนิดกัน ปัญหาใหญ่สำหรับสวิตช์ความต้านทานแบบ unipolar ที่มักจะพบคือ V_{SET} จะซ้อนทับกับ V_{RESET} เนื่องจากทิศทางของการจ่ายศักย์ไฟฟ้า (V_{SET} และ V_{RESET}) เดียวกัน ปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นกับให้เปลี่ยนสถานะมีทิศเดียวกัน เห็นได้ชัด (RRAM แบบ bipolar เนื่องจากใช้ศักย์ไฟฟ้าต่างทิศทางในการควบคุมกระบวนการ SET และ RESET งานวิจัย RRAM แบบ bipolar ได้มีการศึกษาอย่างมากมายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเป็นสวิตช์แบบไม่ลบเลือนในวงจร IC ขนาดใหญ่ (LSIs) ในสวิตช์ความต้านทานแบบ bipolar มีกลไกในการเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน นำไปสู่ลักษณะ I-V curve ดังกล่าว DO และคณะได้สังเกตทิศทางของการสวิตช์แบบทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาของฟิล์ม TiO₂ พบว่ามีความสัมพันธ์กับความหนาของขั้วไฟฟ้า Al และกระบวนการ electroforming ซึ่งมีความจำเป็นในการกระตุ้นอุปกรณ์ในฟิล์ม stoichiometric ขณะที่บางระบบเป็นแบบ electroforming-free ซึ่งจากงานวิจัยทั้งหมดสามารถอนุมานได้ว่า กลไกการเกิดสวิตช์ความต้านทานขึ้นอยู่กับสมบัติความเป็นผลึกของวัสดุและโครงสร้างของอุปกรณ์ การค้นหาความสัมพันธ์ , รางปัจจัยต่าง ๆ และสมบัติของอุปกรณ์ถือเป็นเรื่องที่สำคัญในการพัฒนาไปสู่การสร้างอุปกรณ์ระหว่ RRAM ที่ดีและใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

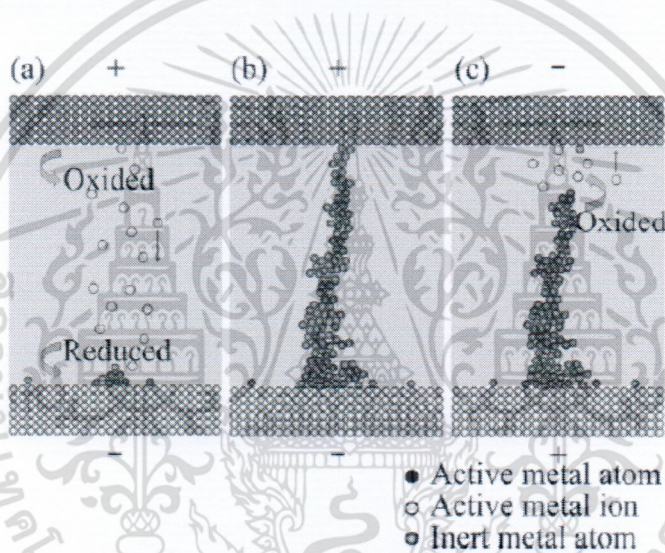
2.2 กลไกการเกิดชนิดของเส้นทางการนำไฟฟ้า

Filament-type and interface-type mechanisms in resistive switching

กลไกของการเกิดลักษณะสวิตช์ ความต้านทานต่ำสำหรับในสถานะ(LSR) กระแสจะเดินทางผ่านเส้นทางการนำไฟฟ้าเฉพาะที่เกิดขึ้นในตัวกลางของชั้นฉนวน ในขณะที่ในสถานะความต้านทานสูง (HSR) กระแสจะเดินทางสม่ำเสมอในชั้นฟิล์มฉนวน ถึงแม้ว่าจะได้มีการแสดงให้เห็นถึงการเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าของระบบสวิตช์ความต้านทาน แต่เส้นทางการนำไฟฟ้ามีความแตกต่างกันมากในแต่ละระบบที่ทดลอง ได้มีการนำเสนอรูปแบบของเส้นทางการนำไฟฟ้าสำหรับสวิตช์ความต้านทาน ได้แก่ การเกิดสะพานโลหะระดับนาโน Metallic nano-bridge, ช่องทางนำไฟฟ้าจาก oxygen vacancies (V_O^{2+} s) , การย้ายตำแหน่งของอะตอม(dislocation) และการเกิด metallic island สิ่งที่แตกต่างกันของชนิดเส้นทางการนำไฟฟ้า คือ ค่าความต้านทานในสถานะ LRS จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ของอุปกรณ์ ขณะที่ค่าความต้านทานของสถานะ HRS จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งกลไกการเกิดของเส้นทางการนำไฟฟ้าเป็นตัวบอก scale limit ของการสร้างอุปกรณ์โดยบ่งบอกด้วยขนาดของเส้นทางการนำไฟฟ้า โดยอุปกรณ์จะต้องมีขนาดอย่างน้อยสองเท่าของขนาดเส้นทางการนำไฟฟ้า จากรายงานของ SZOT [8] ได้ศึกษาผลงานผลการศึกษาสวิตช์ความต้านทานของผลึกเดี่ยว SiTiO_3 เนื่องจาก dislocation แสดงให้เห็นขนาดของ dislocation ในระดับนาโน กระบวนการเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าของ RRAM มีสองรูปแบบ ได้แก่การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เหนี่ยวนำให้เกิดเส้นทางโลหะ (metallic filament) และการเกิดความบกพร่องของที่ว่างออกซิเจน V_O^{2+} ในเส้นทางการนำไฟฟ้า เส้นทางการนำไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น electrochemical metallization (ECM) cell และเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซลล์สะพานนำไฟฟ้า (conductive bridging: CB) หรือ programmable metallization cell (PMC) EMC cell ประกอบไปด้วย ฟิล์มบางของ solid electrolyte, ขั้วไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อปฏิกิริยา electrochemical เช่น Ag, Cu, Ni และ ขั้วโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา electrochemical เช่น Pt, Au, W หรือ Ir เป็นต้น รูปที่ 2.2 อธิบายถึงปฏิกิริยารีดอกซ์ภายใต้การใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าใน EMC cell โลหะที่ขั้วไฟฟ้าที่ไวต่อการเกิด electrochemical ถูกออกซิไดซ์ที่บริเวณผิวของรอยต่อเมื่อถูกไบแอสด้วยความต่างศักย์บวกเข้าไปสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $M \rightarrow M^{z+} + ze^-$ โดย M^{z+} แทนด้วยไอออนบวกของโลหะ เรียกว่า active metal ion จากนั้น ไอออนของโลหะ M^{z+} จะเคลื่อนที่ผ่านชั้น solid electrolyte ไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด (อีกด้านหนึ่งที่เฉื่อยต่อการเกิด electrochemical และจะจับกับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้านี้ตามสมการ $M^{z+} + ze^- \rightarrow M$ เกิดเป็นอะตอมโลหะค่อย ๆ ก่อตัวที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดและต่อกันเป็นสายของอะตอมโลหะ เมื่ออะตอมของโลหะต่อจนมาถึงขั้วไฟฟ้าแอโนดจึงเกิดเป็นเส้นทางการนำไฟฟ้า จึงเกิดเป็นสถานะ ความต้านทานต่ำ (LSR) ดังรูป 2.2(b) ในทางกลับกันเมื่อขั้วไฟฟ้าที่ไวต่อการเกิด electrochemical ถูกไบแอสด้วยความต่างศักย์ไฟฟาลบ เส้นทางการนำไฟฟ้าของอะตอมโลหะจะถูกออกซิไดซ์กลับไปเป็น active metal ion ก่อนที่จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนเป็นโลหะแล้วไปจับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าเหมือนเดิม เกิดเป็นสถานะ HRS ดังรูป 2.2 (c) กระบวนการผันกลับไปมาระหว่างสถานะ HRS และ LRS ทำให้เกิดเป็นสวิตช์ความต้านทาน ระบบ EMC ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในวัสดุจำพวก selenide, sulfide, และ oxide ต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ในการอธิบาย RRAM แบบจำลอง ECM เป็นทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด จากงานวิจัยของ KUND และคณะ ได้ศึกษาฟิล์ม GeSe ในโครงสร้างขนาด 20 nm พบว่ากระแสที่ใช้ในการเขียนอยู่ที่ 10 pA และความเร็วในการเขียนที่ 5ns ได้ทดสอบใน SiO₂ และ ZnO แต่อย่างไรก็ตาม ก็คงยังมีคำถามในรายละเอียดกลไกของกระบวนการ RESET ที่ไม่ชัดเจน ในเรื่องของจลนศาสตร์ของการก่อตัวและการหายไปของเส้นทางนำไฟฟ้า รวมถึงกระบวนการในการทำซ้ำ ทั้งหมดเป็นสิ่งที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการเกิดเส้นทางนำไฟฟ้าที่จะนำไปใช้ในอุปกรณ์จริง



รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดเส้นทางนำไฟฟ้าของ RRAM

ชนิดของรอยต่อ (interface-type) ก็มีผลกับการเกิดคุณสมบัติสวิตช์ความต้านทานเช่นกัน แบบจำลองอีกแบบหนึ่งของสวิตช์ความต้านทานอธิบายถึงชนิดของรอยต่อระหว่างชั้น middle semiconductor และขั้วไฟฟ้าโดยพิจารณาจากค่า barrier height ที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งค่า barrier height สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าและนำไปสู่การเกิดสถานะความต้านทานที่แตกต่างกัน โดยพบลักษณะสวิตช์ความต้านทานแบบนี้ในโครงสร้างของ complex perovskite oxides และ binary oxide จากงานวิจัยของ YANG และคณะได้ศึกษาสวิตช์ความต้านทานของโครงสร้าง Ti/TiO₂/Pt พบว่า TiO₂/Ti เป็น Ohmic contact และรอยต่อของ TiO₂/Pt เป็นแบบ Schottky การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าลบเข้าไปที่ขั้วไฟฟ้า Pt จะทำให้ค่า V₀ เลื่อนขึ้นส่งผลถึงชั้นรอยต่อของ TiO₂/Pt ทำให้ barrier height ลดลงส่งผลถึงการเกิดสวิตช์ความต้านทานของการเปลี่ยนสถานะจาก HRS ไปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LRS ในส่วนของสาร perovskite กลไกที่เกิดขึ้นอธิบายด้วยผลการเก็บสะสมประจุ (charging effect) ที่บริเวณรอยต่อ การกระจายตัวของประจุที่ถูกสะสมไว้จะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง band lineup หรือเพิ่มโอกาสในการ tunneling ผ่าน interface barrier

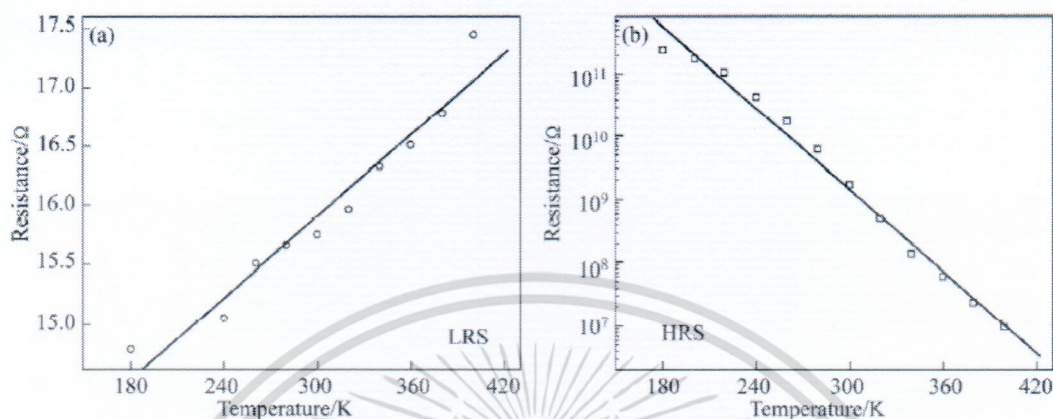
จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความเข้าใจพื้นฐานในกระบวนการเกิดลักษณะสวิตช์ความต้านทานซึ่งถือเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของ RRAM โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของสวิตช์ความต้านทานแสดงคุณสมบัติและมีแบบจำลองที่แตกต่างกัน ซึ่งต้องอาศัยผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ในการอธิบายปรากฏการณ์ ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาโครงสร้างของ Ti/ZnO/Mo เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีศักยภาพในการพัฒนา และสามารถใช้เครื่องแมกเนตรอนสปัสเตอริงเครื่องเดียวกันในการเคลือบตลอดทั้งกระบวนการ (reactive DC magnetron sputtering, RF magnetron sputtering และ DC magnetron sputtering ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังมีแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยวิธีการเจือโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น silver (Ag) ลงบนชั้นของ insulator ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สวิตช์ความต้านทานเพื่อเพิ่มจำนวนของเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้า

2.3 การวิเคราะห์เส้นทางการนำไฟฟ้า

ในการหาหลักฐานเพื่อสนับสนุนแบบจำลองการเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าได้มีการตรวจสอบองค์ประกอบและรูปร่างลักษณะของเส้นทางการนำไฟฟ้าในตัวกลางฉนวนกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีการที่มีประสิทธิภาพคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน R_{LRS} ที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ R_{LRS} และ R_{HRS} ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ ในโครงสร้างของ Ag/ZnO:Mn/Pt จะเห็นว่าค่า R_{LRS} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงความเป็นสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะ โดยการนำไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการกระเจิงของโฟนอน) phonon scattering (เป็นลักษณะเด่นของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของโลหะ) electronic transport ในทางตรงกันข้าม ความต้านทาน (R_{HRS} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นแบบ exponential กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำ จากรายงานวิจัยของ JUNG และคณะได้ศึกษาการเปลี่ยนสภาพความต้านทานในฟิล์ม NiO ที่สถานะ R_{HRS} ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180K พบว่าค่าการนำไฟฟ้ามีค่าไม่แตกต่างจากสถานะ RESET LRS ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้เส้นทางการนำไฟฟ้าหายไปไม่สมบูรณ์ โดยมีโลหะหลงเหลือเป็นจุดบกพร่องในชั้นของฉนวนทำให้การนำไฟฟ้ายังคงลักษณะของโลหะ งานวิจัยหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทาน R_{LRS} และ R_{HRS} ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิถือเป็นข้อมูลที่สำคัญที่ใช้เป็นหลักฐานในการก่อตัวของเส้นทางการนำไฟฟ้าในชั้นฉนวน อีกวิธีการหนึ่งในการหาคุณลักษณะของเส้นทางการนำไฟฟ้าได้มีการใช้ Conductive atomic force microscopy (CAFM) ช่วยในการวิเคราะห์ให้เห็นภาพชัดเจนของเส้นทางการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

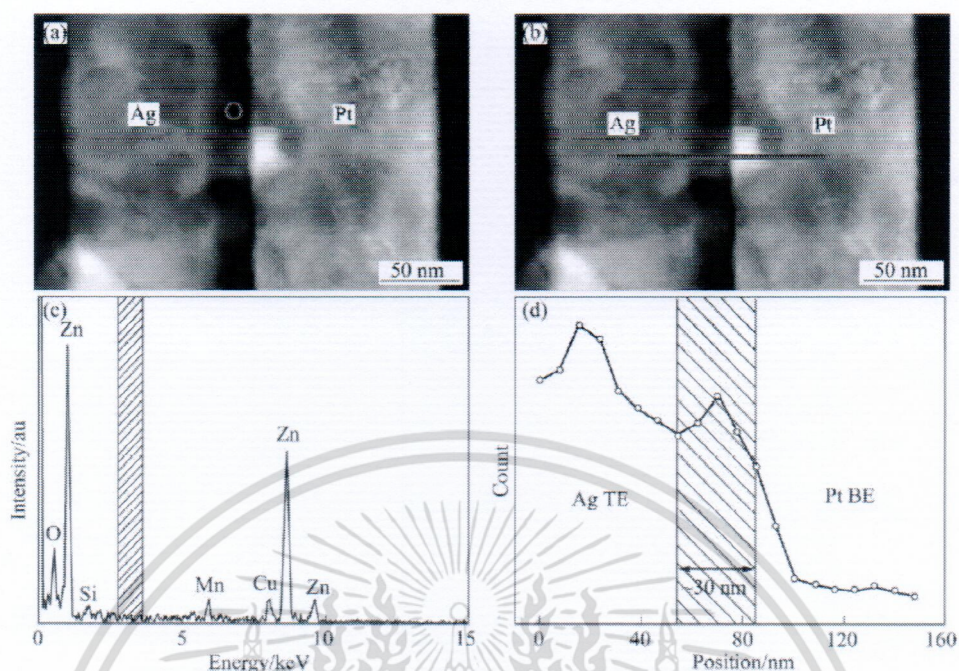
การนำไฟฟ้า (conducting path) ถึงแม้ว่า วิธี CAFM จะมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบหาเส้นทางการนำไฟฟ้าได้อย่างละเอียดแต่



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิแบบ R_{LRS} และ R_{HRS} ของโครงสร้างหน่วยความจำ Ag/ZnO:Mn/Pt

ก็ยังคงไม่สามารถหาค่าประกอบทางเคมีได้ จึงได้มีการทดลองใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนร่วมกับ photoemission electron microscopy (PEEM) ในการตรวจสอบลักษณะรูปร่างและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นทางการนำไฟฟ้าในชั้นฟิล์ม CuO แต่วิธีการนี้ใช้ได้กับโครงสร้างขนาดใหญ่เท่านั้น ไม่สามารถวิเคราะห์ในระดับของนาโนเมตรได้ ต่อมาจึงได้มีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในระดับของนาโนเมตร จากงานวิจัยของ YANG และคณะได้แสดงให้เห็นเส้นทางการนำไฟฟ้าของโลหะเงิน Ag ที่ยื่นเข้าไปยังชั้นของ ZnO:Mn และได้มีการศึกษาเส้นทางการนำไฟฟ้าในชั้นของ ZnO ด้วยเครื่อง Scanning transmission electron microscopy (STEM) ร่วมกับ high-resolution energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ดังรูปที่ 2.4 สเปกตรัม EDX ที่บริเวณเส้นทางการนำไฟฟ้าพบตำแหน่งของ Ag peak ที่ชัดเจนส่วนบริเวณอื่นไม่พบสัญญาณของ Ag peak จาก profile intensity ของ Ag ตามเส้นทางการนำไฟฟ้าพบว่า Ag ไม่เพียงอยู่ที่เส้นทางการนำไฟฟ้าเท่านั้นแต่ยังพบ Ag ที่ขั้วไฟฟ้า Pt อีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการทะลุผ่านชั้น ZnO ไปยังขั้วไฟฟ้าอีกด้าน โดยผลการทดลองนี้มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนแบบจำลองเส้นทางการนำไฟฟ้า (filament model) และแบบจำลองนี้เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สเปกตรัม Energy Dispersive X-ray ของโครงสร้างหน่วยความจำ Ag/ZnO:Mn/Pt

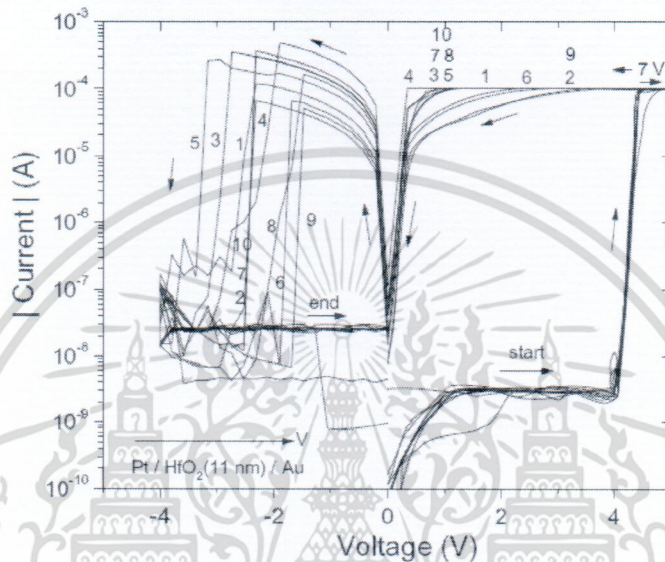
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง/การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าคุณลักษณะของสวิตช์ความต้านทาน (Resistive switching characteristic) เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยสองส่วน คือ ชั้นฉนวนซึ่งมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกประกอบไปด้วย โลหะออกไซด์ เช่น ZnO, ZrO₂, TiO₂, NiO, Al₂O₃, SrZrO₃, BaTiO₃, และ HfO_x โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นศึกษาสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง ๆ ซึ่งจะสามารถเก็บข้อมูลได้เสถียรกว่า (ผลต่างของค่าความต้านทานของสองสถานะ) ส่วนที่สองการศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เช่น Ti, Pt, Au และ TiN เป็นต้น ที่เหมาะสมกับวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิด รวมทั้งศึกษากลไกการเกิดคุณสมบัติ Resistive Switching จากงานวิจัยของ C. Vallée et al. ได้ทำการศึกษาวรรณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับฉนวนโลหะออกไซด์ที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง สำหรับอุปกรณ์ RRAM พบว่า ความบกพร่องแบบ oxygen vacancies ในโครงสร้างโลหะออกไซด์มีส่วนสำคัญอย่างมากในเรื่อง linearity ของอุปกรณ์และกลไกของ SET/RESET และพบว่า Pt เป็นขั้วไฟฟ้าน่าสนใจที่ดีกว่า TiN สำหรับ HfO₂ ที่เตรียมโดยวิธี atomic layer deposition (ALD) ใน RRAM และทำการวัดลักษณะ Resistive Switching จากการวัดกระแสกับความต่างศักย์ดังรูปที่ 2.5 รวมถึงแนะนำวิธีการเลือกขั้วไฟฟ้าที่ดีที่ต้องมีค่า work function ที่สูง และไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (low oxygen affinity) กับชั้นโลหะออกไซด์

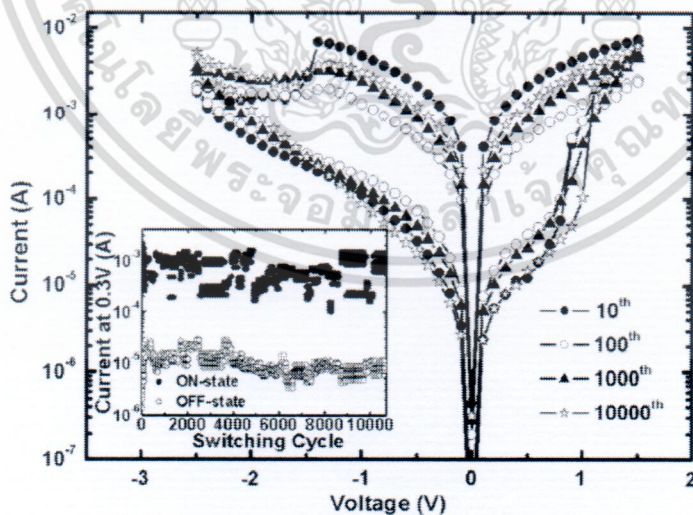
งานวิจัยของ Sheng-Yu Wang et al. ได้ทำการศึกษารื่อง Resistive Switching Characteristic ของโครงสร้างอุปกรณ์ Ti/ZrO₂/Pt ที่เตรียมชั้น ZrO₂ โดยวิธีสปีสเตอร์ริงลงบนแผ่นรองรับ Pt/Ti/SiO₂/Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wafer พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้มากถึง 10,000 รอบโดยมีเสถียรภาพที่ความต่างศักย์ 0.3 V และทดสอบสมบัติการเขียนและการลบของอุปกรณ์ โดยใส่พัลส์ความต่างศักย์ ที่ +6V, 10ns และที่ความต่างศักย์ -3V, 10ns จะพบข้อผิดพลาดขึ้นหลังจากดำเนินการไปได้ 10,000 รอบดังแสดงในรูปที่ 2.6



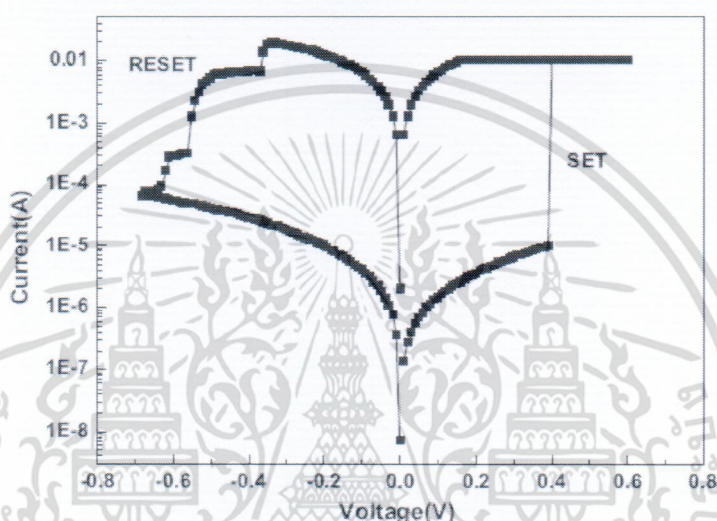
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ Pt/HfO₂/Au MIM RRAM ในการวัด 10 รอบ



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพความทนทานของอุปกรณ์ Ti/ZrO₂/Pt จากการวัด sweeping dc voltage bias และค่ากระแสของสถานะ ON OFF ในระหว่างการวัด 10,000 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

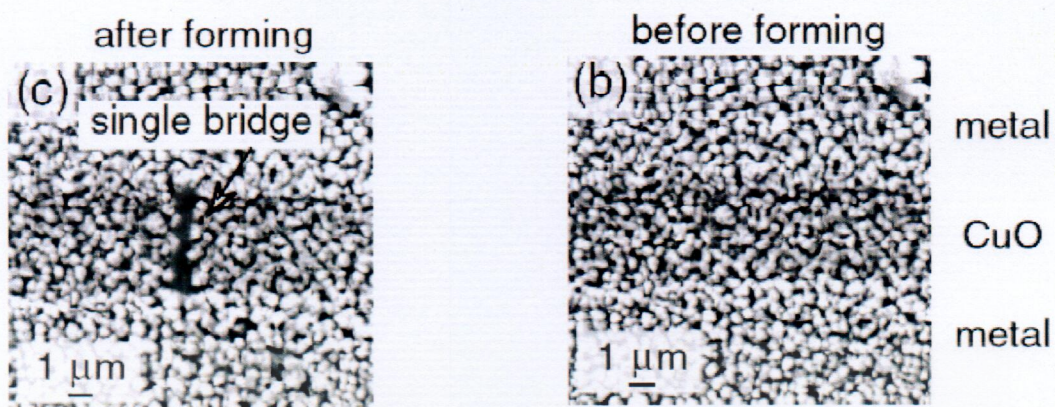
จากงานวิจัยของ Jian-Wei Zhao et al. ทำการศึกษาโครงสร้างของ Ag/GZO/ZnO/Pt เพื่อทำเป็น resistive switching โดยเพิ่มชั้นของ ZnO เป็นชั้น buffer ก่อนชั้นของ ZnO:Ga (GZO) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสปัตเตอร์ลงบน SiO₂/Si เพื่อเพิ่มคุณภาพของชั้นฟิล์มบาง GZO และเสถียรภาพของ Resistive Switching Characteristic พบว่าค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในสถานะความต้านทานสูงมีค่าสูง (high resistance state) ถึง 2000 เท่า เมื่อเทียบกับสถานะความต้านทานต่ำ (low resistance state) และค่า operation voltage ที่ 0.4 V (ON-state) และ ที่ -0.35/-0.55 (OFF state) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



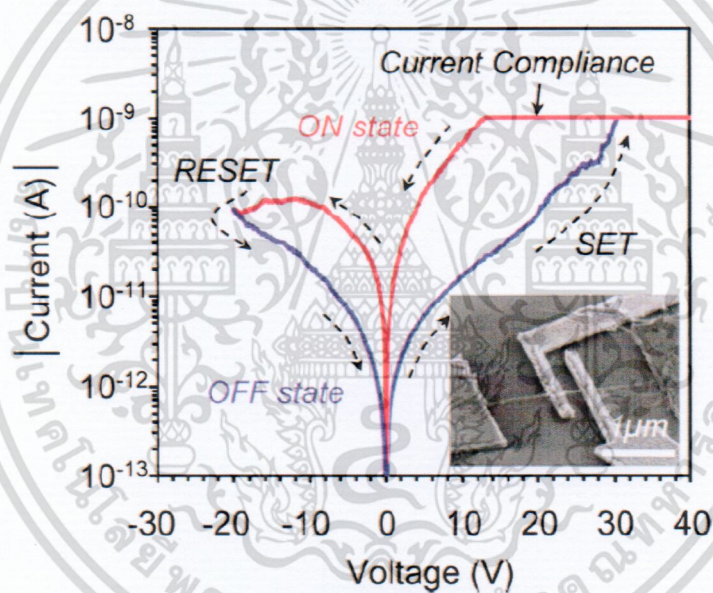
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ I-V characteristics ของ Ag/GZO/ZnO/Pt memory devices

จากงานวิจัยของ Kohei Fujiwara et al. ได้ศึกษา Resistance Switching ของโครงสร้าง โลหะ/CuO/โลหะ โดยใช้ Pt กับ Ni เป็นขั้วโลหะและศึกษากลไกการเกิด Conductive Bridge ภายหลังจากการใส่สนามไฟฟ้าครั้งแรกซึ่งทำให้เกิดสถานะความต้านทานต่ำ ดังรูปที่ 2.8 โดยศึกษาพบ Cu metal filament network ฝังตัวใน CuO_x bridge ซึ่งเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในสถานะความต้านทานต่ำ

จากงานวิจัยของ Kazuki Nagashima et al. ได้สร้าง memristor switching โดยใช้ลวดนาโน ออกไซด์ที่มี MgO เป็นแกนกลางและ Cobaltoxide ล้อมรอบ ที่เตรียมโดยวิธี vapor-liquid-solid (VLS) growth ลงบนแผ่นรองรับ SiO₂/Si wafer และใช้ Pt เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าได้ค่า compliance current ที่ 10 nA โดยช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 250 nm ดังรูปที่ 2.9 และได้ศึกษาการทำงานของ resistive switching ของลวดนาโน cobalt oxide เกิดจากปรากฏการณ์รีดอกซ์ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type conduction path) ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองเดิมที่คิดว่าเป็นผลมาจาก ความบกพร่องจากที่ว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy)



รูปที่ 2.8 ภาพ SEM ของโครงสร้าง โลหะ/CuO/โลหะ ภายหลังจากการใส่ความต่างศักย์



รูปที่ 2.9 แสดง I-V characteristics ของ Pt/cobalt oxide nanowire/Pt device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของโลหะ/ฉนวน/โลหะ ของฟิล์มบาง Ti, ZnO และ Mo โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง วิธีดีซี/อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC/RF Magnetron Sputtering) ทำการศึกษาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางชั้นต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว และพฤติกรรมของสวิตช์ความต้านทานจากการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ในโครงการวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนของการดำเนินการทดลอง โดยรวมดังนี้

1. การเตรียมวัสดุรองรับ (กระจกโซดาลาม)
2. การเตรียมฟิล์มบาง Ti, ZnO และ Mo ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม
3. การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CoFeB

1. การเตรียมวัสดุรองรับ

วัสดุรองรับที่ใช้ในการทดลองเป็นกระจกโซดาลาม (SLG) $3 \times 3 \text{ cm}^2$ หนา 0.20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1

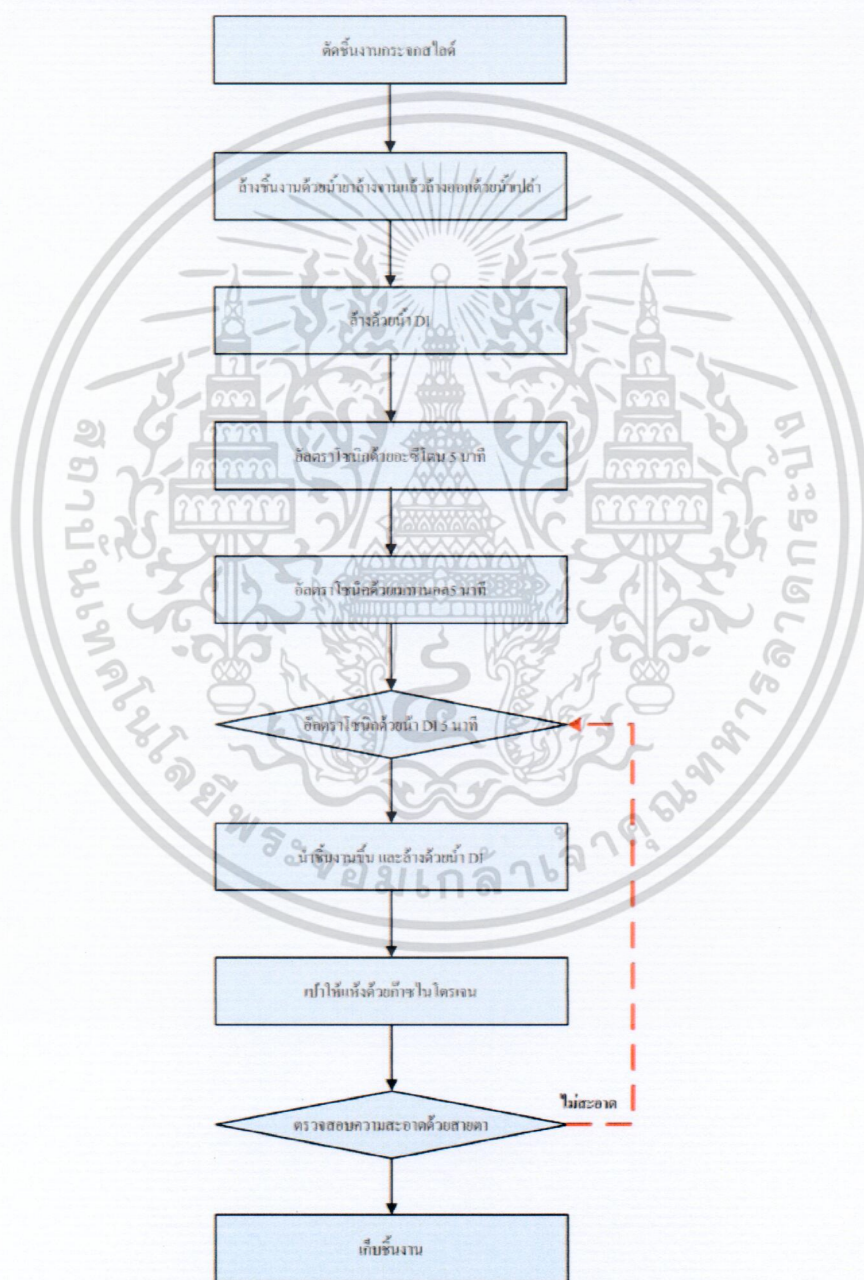


รูปที่ 3.1 วัสดุรองรับกระจกโซดาลาม

- 1.1 ซึ่งวัสดุรองรับเหล่านี้ก่อนนำมาศึกษาหรือเคลือบฟิล์มจะต้องนำมาทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวของวัสดุรองรับให้ปราศจากคราบฝุ่นไขมัน สารอินทรีย์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผิวกระจกสไลด์และซิลิกอนเวเฟอร์ที่สะอาดทำให้ฟิล์มที่เคลือบยึดติดแน่นลงบนผิววัสดุรองรับทั้งสอง ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติที่ดีของฟิล์มด้วย ดังนั้นจึงมีขั้นตอนการทำความสะอาดแบ่งตามประเภทของวัสดุรองรับ ดังนี้ เริ่มจากตัดชิ้นงานกระจกให้มีขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ นำชิ้นงานล้างด้วยน้ำยาล้างจาน เพื่อขจัดฝุ่นและคราบไขมันแล้วล้างออกด้วยน้ำเปล่า แล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น (DI) อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 5 นาทีเพื่อล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คราบไขมันและสิ่งสกปรกที่ติดแน่นที่ไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ แล้วนำไปอัลตราโซนิคต่อด้วยเมทานอลอีก 5 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอัลตราโซนิคด้วยน้ำกลั่น เป็นเวลา 5 นาที นำชิ้นงานขึ้นโดยใช้คีบคีบและล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นเก็บแผ่นรองรับที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วไว้ในกล่อง นำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อรอทำการเคลือบต่อไป (หากยังมีคราบสกปรกอยู่ ให้นำกลับไปทำความสะอาดใหม่ในขั้นตอนการอัลตราโซนิคด้วยน้ำ DI อีกครั้งเป็นเวลา 5 นาที) โดยขั้นตอนการล้างวัสดุรองรับกระจกสไลด์แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพโตอะแกรมแสดงการทำความสะอาดกระจกชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธี DC/RF Magnetron Sputtering

การเตรียมฟิล์มบาง Mo และ Ti โดยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Magnetron Sputtering) จากเป้า Mo และ Ti ความบริสุทธิ์ 99.995% ส่วนการเตรียมฟิล์มบาง ZnO ใช้วิธี RF Magnetron Sputtering เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจก และใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) 99.9995 % เป็นก๊าซพลาสมา โดยควบคุมการไหลของก๊าซด้วยเครื่องควบคุมการไหล (Mass Flow Controller) ในการทดลองจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ของการเคลือบฟิล์มที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความดันก๊าซ อาร์กอน กำลังไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ และระยะห่างระหว่างเป้ากับแผ่นรองรับ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยได้ ควบคุมระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับที่ 10 เซนติเมตร แล้วนำฟิล์มที่เตรียมตามสภาวะเงื่อนไข ต่างๆ ไปศึกษาสมบัติโครงสร้าง สมบัติพื้นผิว และสมบัติทางไฟฟ้าโดยมีรายละเอียดการเตรียมฟิล์มดังนี้

1. ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศ (Chamber) โดยเก็บเศษฝุ่นผง และเช็ดทำความสะอาด ภาชนะสุญญากาศที่เกิดขึ้นขณะสปัตเตอร์ในครั้งที่ผ่านมาออกให้หมด ใช้อลูมิเนียมฟอยล์บุผนัง ด้านในภาชนะสุญญากาศเพื่อป้องกันคราบติดตามผนังขณะสปัตเตอร์
2. นำวัสดุรองรับที่เตรียมไว้ในข้อ 1 มาวางไว้บน (ทั้งกระจกสไลด์) หนองวัสดุรองรับชิ้นงาน รองรับ ซึ่งอยู่ด้านล่างของภาชนะสุญญากาศ และเป็นขั้วบวก (Anode) เพื่อใช้เป็นชิ้นงานเคลือบ โดยมี เป้า Mo, ZnO, Ti ที่ติดอยู่ด้านบนและเป็นขั้วลบ (Cathode) กำหนดระยะห่างระหว่างเป้ากับวัสดุรองรับ เป็น 10 เซนติเมตร ก่อนทำการสปัตเตอร์ต้องปิดเป้าด้วยชัตเตอร์ (Shutter) ที่ทำจากอลูมิเนียมเพื่อ ป้องกันการเคลือบ แล้วปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท
3. เปิดสวิตช์เครื่องทำความเย็นและระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนของเครื่องสูบบแบบ แพรื่อ (Diffusion pump : DF) และขั้วลบ (Cathode) ขณะทำการสปัตเตอร์
4. เปิดสวิตช์ควบคุมเครื่องสปัตเตอร์ เปิดระบบปั๊มเริ่มจากเปิดสวิตช์เครื่องสูบลูก (Rotary pump : RP) เปิดเครื่องสูบบแบบแพรื่อ (Diffusion pump : DF) สร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่าประมาณ 8.5×10^{-6} mbar (ซึ่งจะใช้เป็นค่าความดันเริ่มต้น)Base Pressure) ของระบบก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์ม
5. เปิดระบบก๊าซอาร์กอน (Ar) หมุนเปิดวาล์วที่ถังก๊าซและปรับปริมาตรการปล่อยก๊าซ เพื่อ ปล่อยก๊าซอาร์กอนจากถังบรรจุก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยปรับวาล์วจนความดันภายในภาชนะ สุญญากาศมีค่าตามสภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ โดยการปรับเครื่องควบคุมการไหล (Mass Flow Controller) ของก๊าซอาร์กอนเพื่อควบคุมความดันก๊าซอาร์กอนจนกว่าจะคงที่
6. เปิดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หมุนปรับเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt) แล้วปรับกำลังไฟฟ้าตามที่ ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อป้องกันกำลังไฟฟ้าให้แก่คาโทด จนกระทั่งเกิดกระบวนการโกลด์วิสซาร์ดจ ขึ้นในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยชัตเตอร์ยังคงปิดกั้นระหว่างคาโทดกับชิ้นงาน
7. ทำการพรีสปัตเตอร์ (Pre-sputtering) บริเวณผิวหน้าของเป้า โดยไม่ต้องเปิด ชัตเตอร์เพื่อเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความสะอาดผิวหน้าเป่าก่อนการเคลือบเป็นเวลาประมาณ 5 นาที หรือรองกว่าค่าความดันก๊าซอาร์กอนที่ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 5 นั้นจะคงที่ บันทึกผลค่า (V_{pre}) และ (I_{pre}) ที่เกิดขึ้นจากโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์แสดงบนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

8. เริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มบางต่าง ๆ โดยทำการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่คาโทดตามสภาวะเงื่อนไขที่ต้องการ และทำการเปิดชัตเตอร์ที่ปิดหน้าเป่าสารเคลือบออก เพื่อเริ่มกระบวนการเคลือบฟิล์มลงบนชิ้นงาน พร้อมทั้งบันทึกผลค่าต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และความดัน (P_{coat}) ที่เกิดขึ้นขณะเริ่มทำการเคลือบฟิล์ม

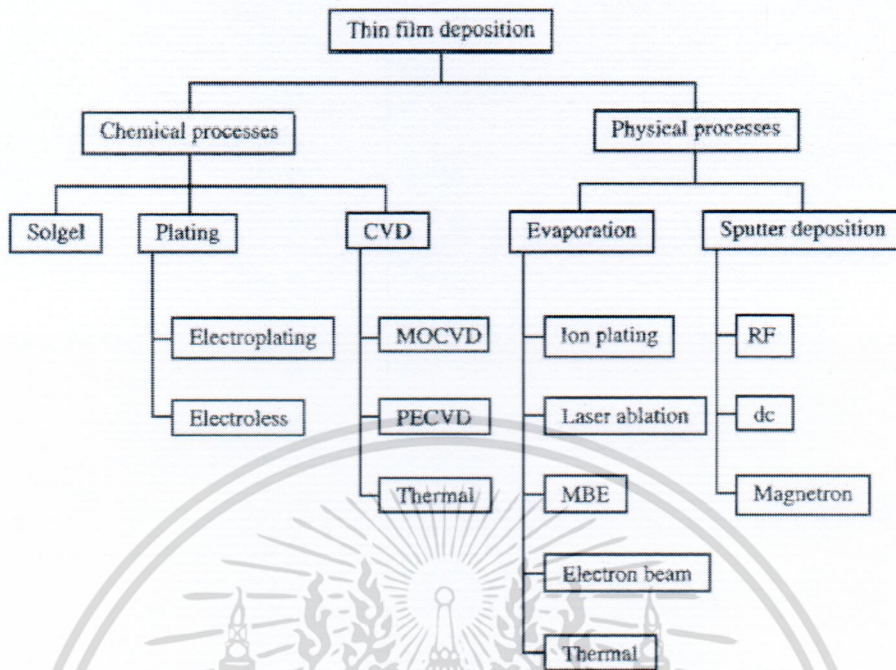
9. ทำการเคลือบฟิล์มตามเวลา (t) ที่กำหนดเพื่อให้ได้ค่าความหนาที่ต้องการ

10. หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปิดชัตเตอร์ ปิดแหล่งจ่ายไฟ ปิดระบบน้ำหล่อเย็น และปิดแก๊สอาร์กอน รอให้ภายในภาชนะสุญญากาศค่อย ๆ เย็นลงแล้วจึงเปิดอากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศเพื่อเปิดเอาชิ้นงานออกมา

11. นำชิ้นงานฟิล์มบางออกจากภาชนะสุญญากาศ และทำการวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติต่างๆต่อไป

3.3 การเคลือบฟิล์มบาง (Thin film deposition)

วิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน [2] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบางที่ต้องการตามความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางนั้นแบ่งได้ 2 วิธีดังรูป 3.3 คือ



รูปที่ 3.3 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

1. วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นรองรับ ซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition) และวิธี โซลเจล (Sol-gel)
2. วิธีทางกายภาพ (Physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับ โดยการใช้ความร้อน (Thermal evaporation) และระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) และวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)

ในส่วนของวิธีทางกายภาพที่ส่วนใหญ่นิยมใช้กันสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุดอาศัยการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยกลายเป็นไอในสภาวะสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอซึ่งไอสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับ (substrate) ที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับจะไม่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริง ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไอออนสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอร์ริงวิ่งชนแผ่นรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง เนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอร์ริงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อไอออนของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนแผ่นรองรับก็ฝังตัวแน่นลงในแผ่นรองรับมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับแผ่นรองรับดีกว่าวิธีการระเหยสาร

กระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

กระบวนการสปัตเตอร์ริงเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุที่ต้องการทำฟิล์มบางถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุตั้งกล่าว กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังรูปที่ 3.4 แต่เนื่องจากในการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มสารเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (ion gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือผลิตได้จากใช้กระบวนการโกลดิสชาร์จ (Glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง (DC Magnetron Sputtering) เป็นต้น ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการ สปัตเตอร์ริงได้แก่

- สารเคลือบหรือเป้า (Target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นวัสดุรองรับ (substrate)
- อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ริงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมทั่วไป คือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคประจุชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอร์ริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์ การชนระหว่าง ยพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาค ที่ให้การส่งถ่าย 2 อนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความ ต้องการ ในกระบวนการจริงใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซอาร์กอนทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนด้วยไฟฟ้า

• อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มบางเคลือบตามต้องการซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Iron gun) เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูง และให้ไอออนได้ในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอร์ริงทั่ว ๆ ไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow discharge) ในการให้ไอออนในกระบวนการเคลือบอย่างต่อเนื่อง ในการชนของไอออนกับเป้าจะเกิดอิเล็กตรอนซึ่งอิเล็กตรอนจะทำให้อาร์กอนเกิดการแตกตัวอีกครั้ง



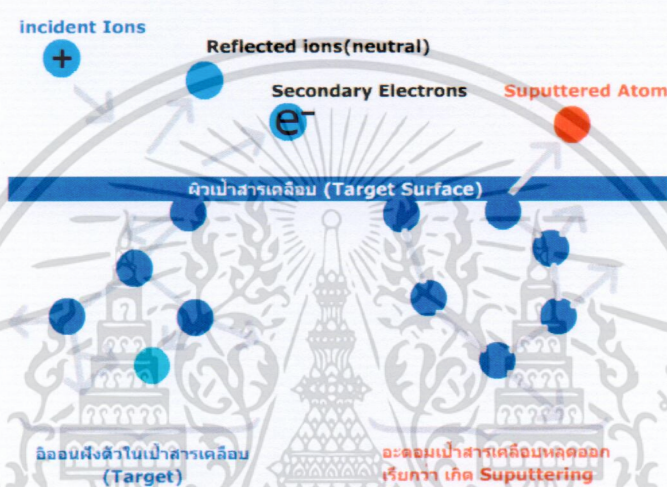
รูป 3.4 กระบวนการเกิดสปัตเตอร์ริง ขณะไอออนชนกับผิวเป้าเคลือบ

อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ—เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.5 ดังนี้

- การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ
- การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ
- การฝังตัวของไอออน (Ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน (1 keV) สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวบนเป้า Target

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวนี้นี้ว่า Altered surface layers
- การสปัตเตอร์ การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า สปัตเตอร์ริง



รูปที่ 3.5 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

กระบวนการเกิดโกลดิสซาร์จ

ในการผลิตอนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้น วิธีที่นิยมและใช้กันมาก ได้แก่ กระบวนการ โกลดิสซาร์จ โดยในกระบวนการโกลดิสซาร์จจะเกิดขึ้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว ที่วางห่างกันในทิศทางที่ตรงกันข้ามภายใต้ความดันบรรยากาศต่ำ ($10^{-3} - 10^{-1}$ Torr) เมื่อเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อย กระแสไฟฟ้าจะเกิดจากอิเล็กตรอนและไอออนบวก ซึ่งได้จากการแตกตัวก๊าซ เนื่องจากการชนกันเองหรือถูกชนโดยรังสีคอสมิก อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ (Cathode) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมาก เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจนถึงแรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจนมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของก๊าซเฉื่อยที่อยู่ในสถานะสุญญากาศ ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เรียกว่าการไอออไนซ์ของก๊าซ โดยไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วคาโทดที่ติดเป้าสารเคลือบไว้ด้านบน ทำให้อิเล็กตรอนชุดที่สองและอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าสารเคลือบถูกชนหลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบด้วยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทโมเมนตัม โดยอะตอมของเป้าสารเคลื่อนที่ที่ถูกชนจะฟุ้งกระจายภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งพร้อมที่จะตกลงบนแผ่นรองรับส่วนอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วแอโนดและทำให้เกิดการไอออไนซ์ก๊าซอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่เพื่อรักษาสภาวะโกลด์ดิสชาร์จต่อไป หลังจากการไอออไนซ์ของก๊าซไอออนซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าทำให้บริเวณขั้วคาโทดมีประจุบวกเกาะกลุ่มกัน (Positive space charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สู่อานอดอย่างรวดเร็วทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณขั้วคาโทดมีค่าสูง ศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้ เมื่อพ้นจากบริเวณคาโทดสนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลง อิเล็กตรอนหลังการไอออไนซ์หลาย ๆ ครั้งบริเวณใกล้คาโทดจะสูญเสียพลังงานไปมากไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองภายใต้สนามไฟฟ้าที่ต่ำนี้เพื่อให้มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะไอออไนซ์ก๊าซครั้งต่อไปได้ จึงเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด โดยระหว่างนี้อาจทำได้เพียงกระตุ้น (Excited) อะตอมของก๊าซเท่านั้น เมื่ออะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นกลับสู่กราวด์สเตทจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออก จึงเกิดเป็นสีต่างๆ ตามชนิดของก๊าซเรียกว่าเกิดโกลด์ดิสชาร์จ ส่วนไอออนบวกที่วิ่งเข้าสู่คาโทดจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่คาโทดให้เป็นกลางทางไฟฟ้าและกลับจากสภาวะไอออนสู่กราวด์สเตท โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอมของก๊าซจากสภาวะไอออนสู่กราวด์สเตทนี้มีความถี่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดเป็นบริเวณมืด และบริเวณมืดนี้เกิดขึ้นในช่วงระยะปลอดการชนจากผิวคาโทดโดยเป็นระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซ โดยระยะของแถบมืด จะเปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศภายในและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด พบว่าผลคูณระหว่างความดันกับระยะของแถบมืดมีค่าคงที่ เมื่อความดันลดลงแถบมืดจะมีระยะยาวขึ้น ทำให้การผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อยลง กระแสลดลง ดังนั้นอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงจะมีปริมาณลดลงด้วย แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นแถบมืดจะมีค่าลดลง การผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นทำให้ขบวนการสปีดเตอริงสูงขึ้นตามความดันก๊าซ ขณะที่ความดันก๊าซในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนจะมีค่าลดลง อะตอมของสารเคลื่อนที่หลุดออกจากเป้าสารเคลื่อนที่จะถูกส่งผ่านลงเคลื่อนบนแผ่นรองรับได้ยากขึ้น เนื่องจากการชนกันกับโมเลกุลของก๊าซและเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่เป้าสารเคลื่อนที่หรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าเฉลี่ยของการสปีดเตอริงมีค่าลดลงเมื่อมีความดันสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดสปีดเตอริงจะขึ้นอยู่กับความดันก๊าซ และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้าฟุ้งหลายในขบวนการโกลด์ดิสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทางระหว่างขั้วอิเล็กโทรด และระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สองกับโมเลกุลของก๊าซ (ระยะปลอดการชนจะแปรผกผันกับความดันก๊าซ) ถ้าความดันก๊าซต่ำเกินไป หรือระยะทางระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนให้มากพอก่อนการชนกับแอโนด ถ้าความดันก๊าซสูงเกินไป หรือระยะทางระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมากเกินไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนซ์ก๊าซ ดังนั้นทั้งสองกรณีนี้จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าฟุ้งหลายที่มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างสูง เนื่องจากการรักษาภาวะโกลว์ดิซซาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟโกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคาโทดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จ และเมื่อเลื่อนคาโทดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมีเตฟาราเดย์และเข้าสู่เนกาทีฟโกลว์จนเข้าสู่ช่วงคาโทดตาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ลักษณะนี้เรียกว่าสองมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพโกลว์ดิซซาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูง และเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองปริมาณสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ลักษณะนี้เรียกว่า Obstructed grow เมื่อเลื่อนคาโทดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพ้นขอบของคาโทด ตาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะทางสั้นกว่าระยะทางปลดการชนของอิเล็กตรอนจะไม่มีการผลิตไอออน และกระบวนการโกลว์ดิซซาร์จสิ้นสุด แม้จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกก็ไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิซซาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดก็อาจเกิดการอาร์คเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการโกลว์ดิซซาร์จก็ได้

เทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering)

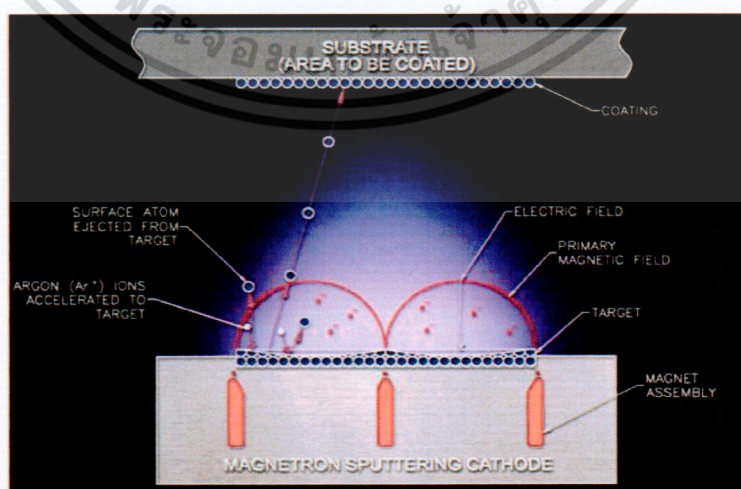
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงภายใต้ระบบโกลว์ดิซซาร์จและใช้สนามแม่เหล็กช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสปัตเตอริง โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ดีซี แมกเนตรอน สปัตเตอริง และอาเอฟ แมกเนตรอน สปัตเตอริง ซึ่งระบบดีซี แมกเนตรอน สปัตเตอริง เป็นการสปัตเตอริงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มบางที่เป็นโลหะ และมีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง ส่วนระบบอาเอฟ แมกเนตรอน สปัตเตอริงนั้นสปัตเตอริงโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเหมาะสำหรับการสปัตเตอริงเคลือบฟิล์มบางที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน

ในช่วงต้นของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงใช้ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งมีอัตราการเกิดสปัตเตอริงที่แปรผันตรงกับอัตราสปัตเตอริงและปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและความดันก๊าซ โดยค่าความดันก๊าซที่ต้องใช้ในการทำงานมีค่าที่ค่อนข้างสูง ($10^{-2} - 10^{-1}$ mbar) ทำให้ค่าระยะปลดการชนเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่า 10 mm เป็นผลให้อะตอมจากเป้าที่หลุดออกมาเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซในระบบมาก และค่าอิมพีแดนซ์ของพลาสมามีค่าที่สูง ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ให้กับระบบจำเป็นต้องมีค่าสูงด้วย (อยู่ในระดับ kV) อัตราการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มจึงมีค่าที่ต่ำเมื่อใช้ระบบการสปัตเตอริงแบบนี้

ในการแก้ปัญหาจึงมีการใช้สนามแม่เหล็กมาช่วยทำให้ระบบการดิซซาร์จดีขึ้น โดยสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะมีผลทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่แบบไซโคลอยด์ในพลาสมา ก่อนที่จะเคลื่อนที่

ไปถึงข้ออาโนด ซึ่งเป็นการทำให้เพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพลาสมา ทำให้โอกาสในการที่อิเล็กตรอนจะไปชนและเกิดการไอออไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก และค่าความดันก๊าซที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่าความดันก๊าซที่ใช้ในระบบไดโอดติสซาร์จโดยมีค่าความดันอยู่ในช่วงประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-4} mbar

ระบบสปัตเตอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (Longitudinal field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ก็ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ติสซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังคงสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (Transverse field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมา อิเล็กตรอนชุดที่สองจะเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทด และลอยอยู่ตามแนวผิวหน้าของคาโทดดังรูปที่ 3.6 ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมาก ใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนชุดที่สองมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดใกล้ผิวคาโทดทำให้เกิดสเปซชาร์จ (Space charge) จากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทดซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชนในดีซี สปัตเตอริง ที่ความดันใช้งานมาก แรงแเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณดาร์คสเปซ (Dark space) ในดีซี สปัตเตอริง ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ลดลงทั่วไปมีค่าประมาณ 300-800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนีตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอนสปัตเตอริงทรงกระบอก (Cylindrical magnetron sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สปัตเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Planar magnetron sputtering)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก

ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนที่สูงมากในระบบแมกนีตรอนและพลาสมาที่เกิดขึ้นจะเข้มมาก บริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอร์ของระบบนี้มีค่าสูง ขณะที่ความดันในระบบจะมีค่าต่ำ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอร์ แมกนีตรอนสปีดเตอร์ิงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอร์สูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง $300\text{-}800 \text{ V}$ ที่ความดันประมาณ $5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอร์ิงขนาดใหญ่ได้ง่ายเมื่อออกแบบใช้งานร่วมกับไตรโอดสปีดเตอร์ิง ระบบสามารถเคลือบได้ที่ความดันต่ำถึง 10^{-5} mbar ส่วนข้อเสียของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอร์ิง คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์มแต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบแมกนีตรอนสปีดเตอร์ิง นี้สามารถควบคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่วัสดุรองรับปริมาณน้อยจึงลดปัญหาความร้อนบนวัสดุรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก

การก่อเกิดฟิล์มบาง

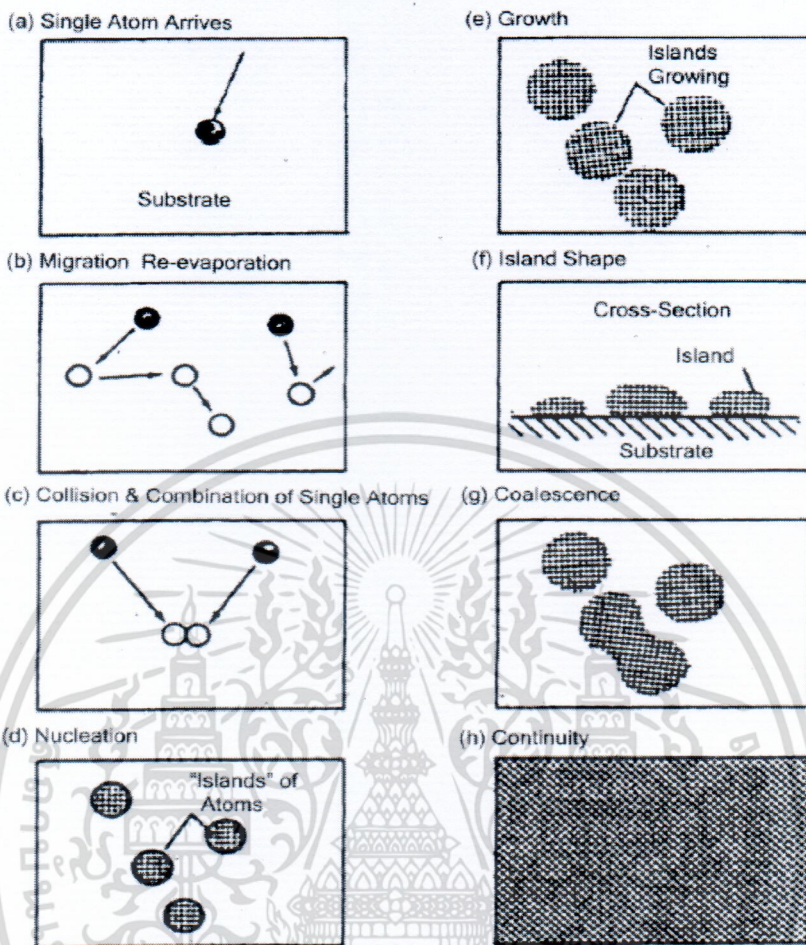
ฟิล์มบาง (Thin film) คือ ชั้นบางๆของวัสดุที่มีความบางมากอยู่ในระดับ นาโนเมตร ถึง ไมโครเมตร ($\text{nm}:10^{-9} \text{ m} - \mu\text{m}:10^{-6} \text{ m}$) สามารถผลิตได้ความบริสุทธิ์สูงถึง 99.99% ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมหลายๆด้าน เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน หรืออุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์กระจกเลเซอร์กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสง เฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำเอาไปใช้ในทางอุตสาหกรรมฟิล์มบาง (Thin film)

การเคลือบในสุญญากาศสารเคลือบที่ตกกระทบผิวแผ่นรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุลดังรูปที่ 3.7(a) โดยพลังงานพันธะ (Bonding energy) ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับแผ่นรองรับและอุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิวแผ่นรองรับอะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดจับ (Absorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจฝ่าเข้าไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป ในรูปที่ 3.7(b) อะตอมสารเคลือบอาจถูกชนจากอะตอมที่เข้ามาใหม่หรืออาจเกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

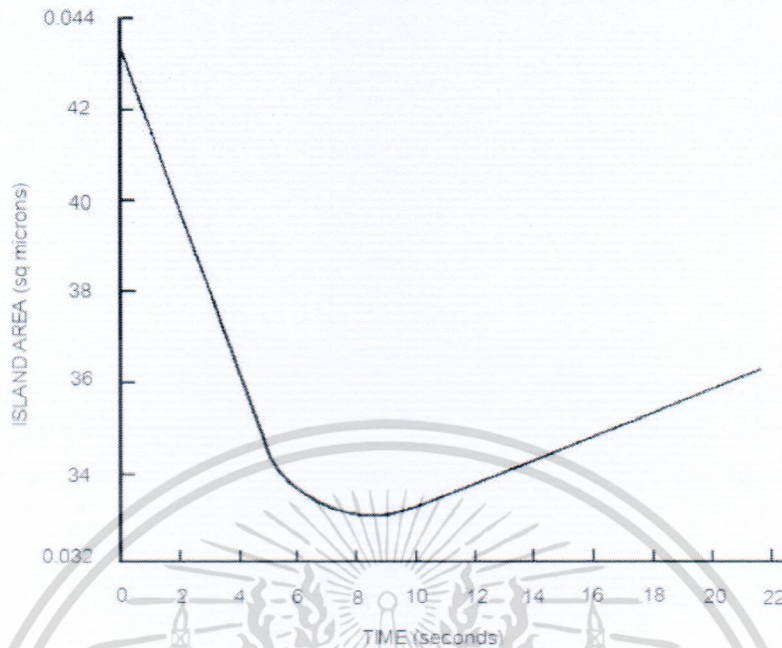
ระเหยกลับและรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ดังรูปที่ 3.7(c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition rate) อะตอมคู่ที่เกิดขึ้นอาจมีการรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวเกิดเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่นๆ การรวมตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่าการเกิดนิวเคลียส ดังในรูปที่ 3.7(d) ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตขึ้นจนกลายเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands growth) ดังรูปที่ 3.7(e) และ รูปที่ 3.7(f) กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเกิดการแตกและชนกับกลุ่มข้างๆ และจะเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) ดังรูปที่ 3.7(g) ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน พบว่าอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลว (Liquid like behavior) ในระหว่างการรวมกันของกลุ่มอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic orientation) การรวมกลุ่มของอะตอมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 0.1 วินาที) หลังจากการรวมกันของกลุ่มอะตอมพบว่าพื้นที่ของอะตอมที่รวมกลุ่มกันบนแผ่นรองรับ (Projected area) มีขนาดน้อยลง ดังรูปที่ 3.8 แต่ความสูงของกลุ่มอะตอมจะมีค่ามากขึ้นดังรูปที่ 3.9

การรวมกันของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 3.7(h) ในบางกรณีการเชื่อมต่อของฟิล์มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 nm ลักษณะผิวของฟิล์มโดยทั่วไปในขณะเกิดการรวมกลุ่มของอะตอมจะมีลักษณะเป็นหุบเขาและเนินเขา การเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจจะเป็นผลึกเดี่ยวหรือมีจำนวนผลึกประกบกันเพียง 2-3 ผลึก โดยถ้าเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมจะเป็นแบบสุ่ม จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้าเคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุรองรับทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว เรียกกระบวนการนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy) ในขณะที่เคลือบฟิล์มอะตอมจะมีการเคลื่อนที่เพื่อเลือกไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยความสามารถในการเคลื่อนที่จะมีมากขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวแผ่นวัสดุรองรับมีค่าสูงและพบว่าเมื่ออัตราการเคลือบลดลงจะช่วยทำให้การโตของผลึกเกิดได้ดีขึ้น อุณหภูมิของผิววัสดุรองรับที่สูงและอัตราการเคลือบที่ต่ำจะทำให้ฟิล์มเคลือบมีขนาดเกรนใหญ่และมีความบกพร่อง (Defect) ในเกรนน้อย

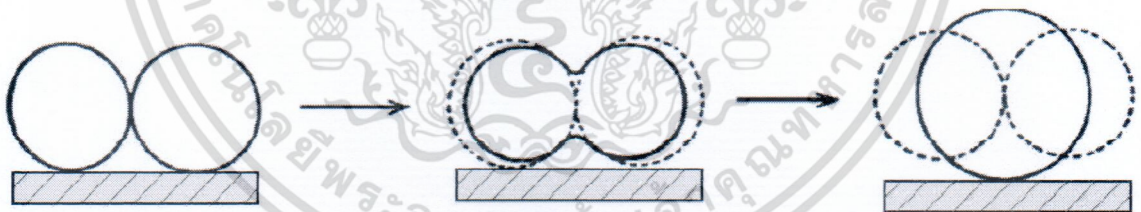


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการก่อเกิดฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม



รูปที่ 3.9 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้นสารเคลือบที่ตกกระทบผิวรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล และเกิดการฟอร์มตัวจนพอกพูนเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ในช่วงเวลานั้นการฟอร์มตัวของฟิล์มบางจะมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบ พลังงานพันธะระหว่างอะตอมสารเคลือบ (Bonding energy) กับวัสดุแผ่นรองรับและอะตอมสารเคลือบด้วยกัน อุณหภูมิของแผ่นรองรับ (Substrate temperature) และตำแหน่งของอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบ การเกิดและการโตของฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อะตอมจากเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนบวกที่มีพลังงานสูง จะหลุดออกและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ผ่านระบบสุญญากาศ ที่มีอนุภาคของก๊าซ และพลาสมาบรรจุอยู่

2. เมื่ออะตอมตกลงมาที่ผิวแผ่นรองรับ อะตอมที่ตกลงมาจะมีพลังงานที่ได้รับจากการถ่ายเทโมเมนตัมจากการชน ทำให้อะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิว (Surface mobility) ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวแผ่นรองรับได้ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดนิวเคลียส

3. หลังจากที้อะตอมเคลื่อนที่ไปบนผิวรองรับ อะตอมจะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสได้หลายรูปแบบดังนี้

3.1 เกิดปฏิกิริยากับผิวแผ่นรองรับ โดยอะตอมที่ตกลงมาเกิดพันธะเคมีกับผิวแผ่นรองรับ อะตอมต่ออะตอม ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับผิวแผ่นรองรับแข็งแรง การเคลื่อนตัวของอะตอมที่ผิวหน้าจะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นนิวเคลียสและอะตอมอื่นบนผิวจะสามารถเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียส ที่เกิดขึ้นแล้ว เพื่อลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างฟิล์มเคลือบกับวัสดุแผ่นรองรับ

3.2 ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับวัสดุแผ่นรองรับมีค่าต่ำ อะตอมก็มีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวสูง ทำให้สามารถเคลื่อนที่มารวมตัวกัน ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส คือเป็นตำแหน่งที่สามารถสร้างพันธะได้แข็งแรงกว่า โดยตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียสนั้นได้แก่ ลักษณะพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องหรือรอยขีด ความบกพร่องของระนาบบนผิวแผ่นรองรับ อะตอมแปลกปลอมบนผิวแผ่นรองรับ บริเวณที่มีประจุบนผิวแผ่นรองรับที่เป็นฉนวน พื้นผิวที่มีความแตกต่างทางเคมีหรือเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างออกไป เป็นต้น

3.3 เกิดนิวเคลียสจากการที่อะตอมเคลื่อนที่ไปชนกับอนุภาคอื่นที่เคลื่อนที่และอยู่บนผิวแผ่นรองรับ และฟอร์มตัวกันเป็นนิวเคลียสที่เสถียร เมื่ออะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสแล้ว ถ้าทำการเคลือบต่อไปก็จะมีจำนวนนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือความหนาแน่นของนิวเคลียสมากขึ้น ซึ่งนิวเคลียสจะเริ่มเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์ม และครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาแน่นของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของวัสดุแผ่นรองรับ หรือลักษณะการเรียงตัวของผลึกของผิววัสดุแผ่นรองรับ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียสที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเคลือบ เพิ่มอัตราการเคลือบ เปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิว เพิ่มการชน เพื่อเพิ่มความบกพร่องในระนาบหรือเพื่อให้ผิวแผ่นรองรับขรุขระ เป็นต้น

4. กลไกการโตของนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแยกตามความแตกต่างของการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสารเคลือบและวัสดุแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

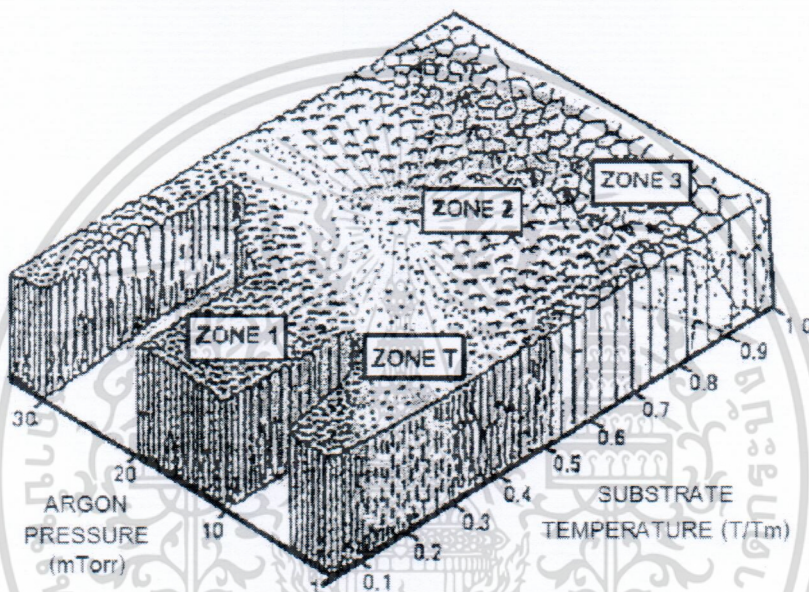
- 4.1 กลไกการเกิดการโตแบบชั้นต่อชั้น
- 4.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ (Three Dimension Volmer-Weber) เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของชิ้นงานกับวัสดุเคลือบแตกต่างกันและโตขึ้นทุกทิศทาง
- 4.3 กลไกการเกิดนิวเคลียส โดยการฟอร์มตัวกันระหว่างชั้นของแผ่นรองรับกับวัสดุเคลือบส่วนใหญ่มักเกิดกับการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นรองรับโลหะ ที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวก็ต่ำด้วย ในเงื่อนไขนี้การโตของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับเทอร์โมไดนามิก กับพลังงานพื้นผิวของผิวงานนั้น พิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ พบว่าเมื่อเกิดการสะสมของอะตอมที่แพร่ไปบนผิวแผ่นรองรับ และเริ่มเกาะตัวกันเป็นนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสในแนวนอนจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีกับผิว ที่เรียกว่าการเติบโตแบบเวทิง (Wetting growth) เช่น ทองบนคาร์บอน อลูมินา ซิลิกอนออกไซด์และโพลีเมอร์ การโตและการรวมตัวกันของนิวเคลียสสามารถลดช่องว่างระหว่างรอยต่อหรือความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างที่รอยต่อของแผ่นรองรับได้ เพราะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างนิวเคลียสและวัสดุที่เป็นแผ่นรองรับ
- 4.4 กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีเล็กน้อยระหว่างวัสดุแผ่นรองรับกับนิวเคลียส จะเกิดการโตอีกแบบต่างหากที่เรียกว่า ลำดับชั้นการโตของเกรนแบบ การเกาะตัว-ช่องแคบ-ต่อเนื่อง (Island-Channel-Continuous Film) ก่อนจะรวมตัวกันนิวเคลียสจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว คือสามารถหมุนและจัดเรียงโครงสร้างตัวเอง การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มของนิวเคลียสเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของนิวเคลียสมีค่าสูงพอที่จะเกิดการแพร่ของอะตอมและการจัดเรียงตัวเป็นนิวเคลียส แบบบอลอัพ (Ball Up) ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเคลือบกับผิวแผ่นรองรับสูงจะมีอัตราการแพร่ต่ำหรือเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบที่แผ่นรองรับ โดยโครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอุณหภูมิเคลือบต่ออุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพ ดังรูปที่ 3.10

บริเวณ 1 (Zone1)

เป็นการเคลือบที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำและความดันก๊าซขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจัดกระจายและเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยแหลมแบบผลึกเรียวย (Tapers crystallites) จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัดทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำมีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อย อังสตรอมที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 mTorr ถ้าความดันก๊าซสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของก๊าซในภาชนะสุญญากาศมีมากขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้นทำให้อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้น้อยและขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่นทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรน มีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลือบที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิจึงมีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจากการระดมยิงของไอออน (Ion bombardment) เป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ

บริเวณ T (Zone T)

เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ริงโดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr เกิดอยู่ในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิววัสดุแผ่นรองรับจะมีปริมาณมากขึ้นและได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของผิวหน้าก็เพิ่มขึ้นและโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็เข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous grain) เต็มพื้นที่และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นไปมาก จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจนกลายเป็นคอลัมน์ (Columnar) ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

บริเวณ 2 (Zone 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้างคอแลมน์นาร์ ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของพื้นผิวของอะตอม) และขนาดของคอแลมน์นาร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอแลมน์นาร์

บริเวณ 3 (zone 3)

บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 mTorr การแพร่จะมีค่าสูงและส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของคอแลมน์นาร์จะมีขนาดใหญ่และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องมาจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored strain energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบเกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจากคอแลมน์นาร์เป็นผลึกเดี่ยว

3.4 การตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่าง (Sample Characterization)

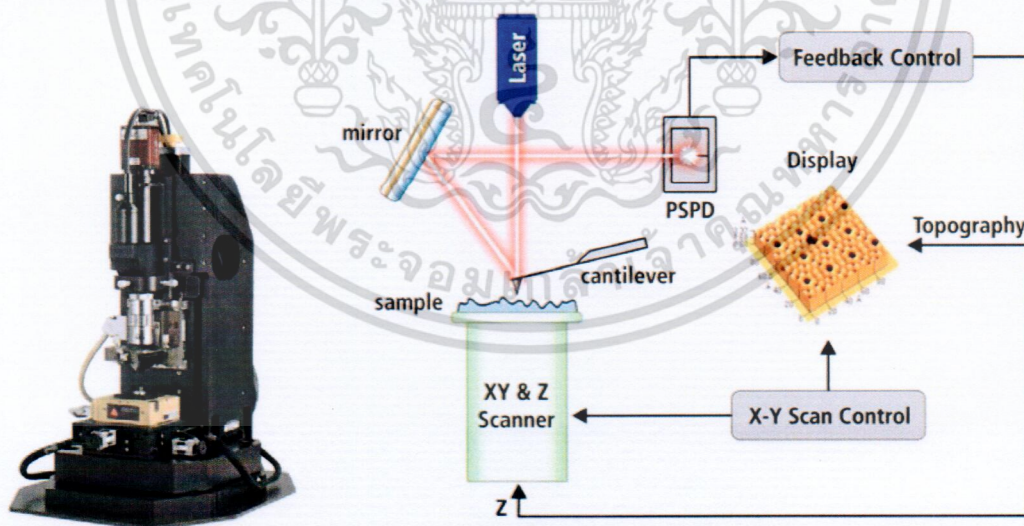
3.4.1 Surface Morphology (Atomic Force Microscope) รุ่น Park systems model XE100 รูปที่ 3.11

การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว Atomic Force Microscope (AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนโดยเฉพาะเช่นเดียวกัน กับ STM แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง STM และสร้างขึ้นมาด้วยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับเครื่อง STM โดยเครื่อง AFM จะสามารถทำงานได้โดยการใช้อุปกรณ์ตรวจหรือโพรบ (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก (เหมือนกันกับเครื่อง STM) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) ที่สามารถโก่งงอตัวได้เคลื่อนที่สัมผัสไปบนพื้นผิวของวัตถุ (ซึ่งสามารถที่จะวัด แรงกระทำที่ปลายแหลมของโพรบได้แม้ว่าจะมีขนาดน้อยมากในระดับนาโนก็ตาม) และคุณสมบัติของเครื่อง AFM ที่มีมากกว่าเครื่อง STM ก็คือ สามารถที่จะตรวจวัดพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เช่น พื้นผิวโพลีเมอร์, เซรามิก, คอมโพสิต, กระจกหรือแก้ว หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่าง ๆ ก็สามารถที่จะวัดได้

หลักการทำงานของเครื่อง AFM การผ่านแสงเลเซอร์ไปที่กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับ

พื้นผิว ของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลม และพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์เช่นเดียวกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลัก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย) วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1. เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง
2. เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้นิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั่นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คง ที่หรือไม่แม่นยำได้

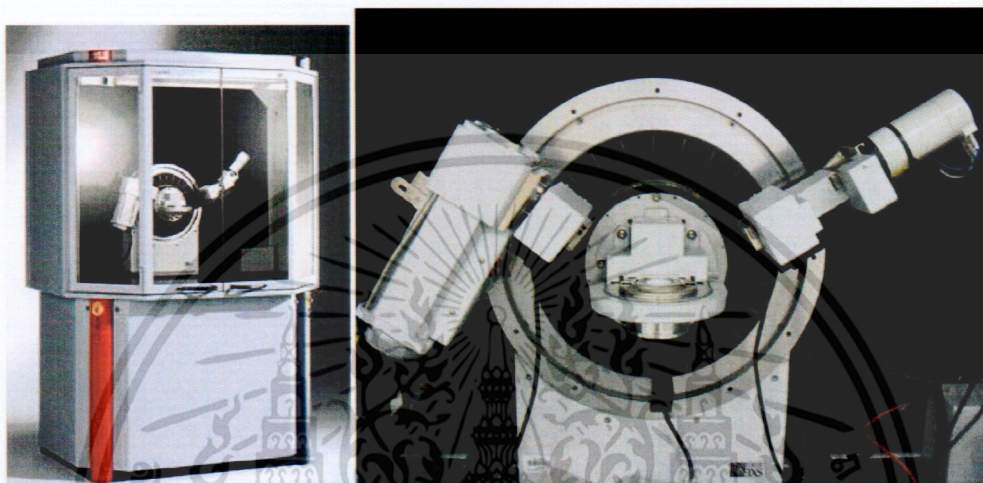


รูปที่ 3.11 เครื่อง AFM (Parks systems model XE100) และแผนภาพหลักการการทำงานของเครื่อง AFM

3.4.2 Structural Property (X-ray diffraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกันโดยการวางตัวอย่างชิ้นงานตามตัวอย่างดังรูปที่ 3.12 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

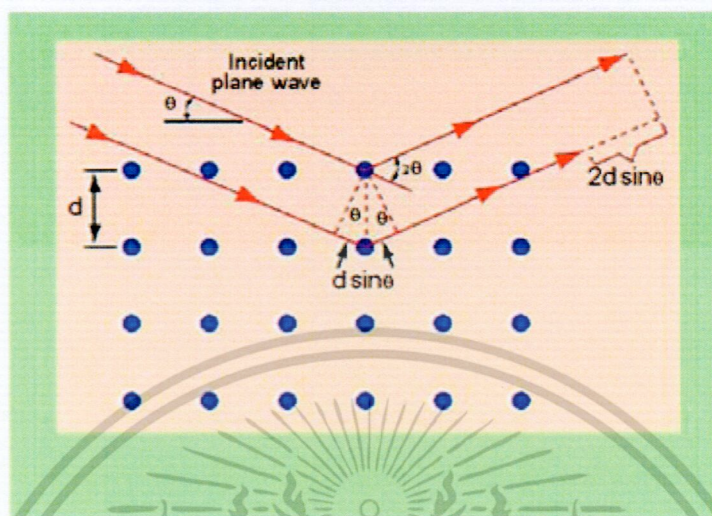
หลักการและวิธีการวิเคราะห์

วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบนที่มุมสะท้อน (เท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ได้ถูกเสนอในรูปสมการของ Bragg's Law สมการ

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

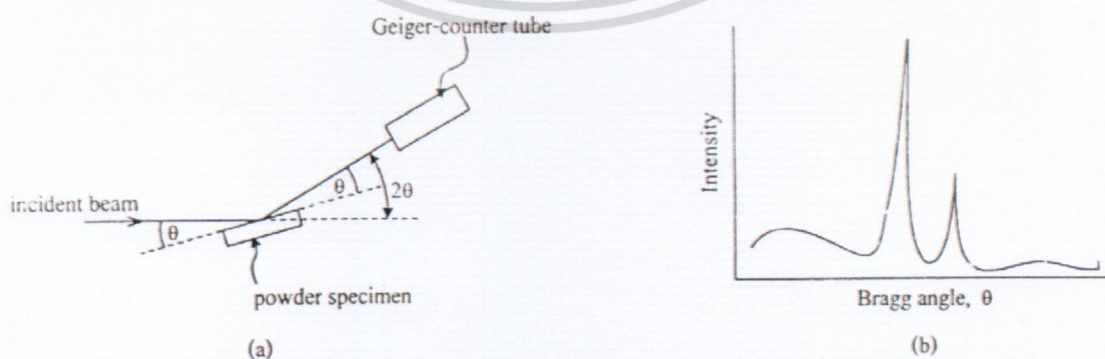
เมื่อ d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบของแลตทิซที่มีดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices) ของระนาบ hkl โดยที่เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะอาศัยลำรังสีเอ็กซ์ (X-ray Beam) ที่มีค่าความยาวคลื่นเป็น λ จากแหล่งกำเนิดพุ่งชนกับผิวเคลือบ เกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนออกมานั้นจะถูกเก็บบันทึกในรูปของฟังก์ชันของมุมการเลี้ยวเบน (Diffracted Angle, θ) โดยความเข้มของสัญญาณ (Intensity) จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ถ้ามุมของการเลี้ยวเบนเป็นไปตาม Bragg's Law

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ภายในโครงผลึกตามเงื่อนไขของ Bragg's Law

X-ray Diffractometer (XRD) เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึกโดยมีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ประกอบอยู่ เช่น Geiger Counter tube หรือ Ionization Chamber จากรูปที่ 3.14a แสดงให้เห็นว่าทั้งชิ้นงานและ Geiger Counter Tube จะเคลื่อนที่ โดย Geiger Counter Tube เคลื่อนที่เร็วกว่าเป็น 2 เท่าเสมอ ทำให้อุปกรณ์ตรวจจับรังสีนี้อยู่ในมุมที่เหมาะสมสำหรับการสะท้อนรังสีตามกฎของ Bragg สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ดังรูปที่ 3.14b ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายแฟกเตอร์ด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี (Volume of Irradiated Material) รูปทรงของการหักเห (Diffraction Geometry) และการวางชิ้นงาน (Sample Alignment) เป็นต้น

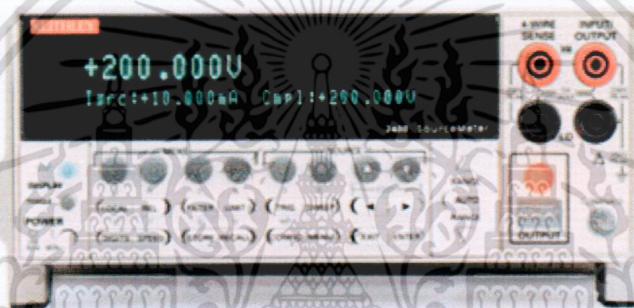


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 a) X-ray diffraction b) Intensity peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนแสง

3.4.3 Electrical Property (I-V characteristic) Keithley 2400 voltage-current source

เป็นการหาสมบัติ resistive switching ของโครงสร้าง โลหะ/โลหะออกไซด์/โลหะ สำหรับประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำแบบความต้านทาน สมบัติทางไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับใช้เป็นหน่วยความจำหรือที่เรียกว่า resistive switching และสเก็ลกราฟในการเปลี่ยนสถานะจากความต้านทานสูงไปเป็นความต้านทานต่ำที่ส่งผลต่อการนำไปใช้งานจริง โดยสามารถหาสมบัติดังกล่าวได้จากการวัด Current-voltage characteristic โดยการไบแอสความต่างศักย์และวัดค่าของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ โดยลักษณะของความสัมพันธ์อธิบายดังรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดค่าความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของโครงสร้างที่ประดิษฐ์ขึ้น (Keithley 2400)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

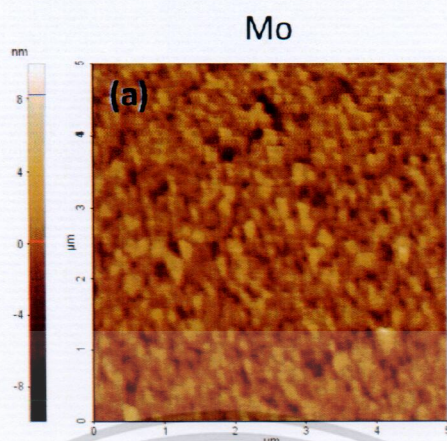
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโมลิบดีนัม (Mo)

ฟิล์มบางโมลิบดีนัมความหนาประมาณ 500 nm ถูกเตรียมลงบนแผ่นรองรับกระจกโซดาลามด้วยวิธี ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า โดยใช้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มดังตารางที่ 4.1 ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเรียบในระดับของนาโนเมตร ลักษณะของเกรนที่แน่นมีขนาดของเกรนประมาณ 100-200 nm มีค่าความขรุขระ (roughness) ประมาณ 1.0 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ความแน่นของฟิล์มมีประโยชน์ในการป้องกันการแพร่ของไอออนจากแผ่นรองรับไม่ให้เข้าไปทำลายโครงสร้างของเซลล์สวิตช์ ความต้านทานที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง Mo ด้วยวิธี DC magnetron sputtering

object	Specification
Target	Mo Purity (99.995%) 4inch diameter
Substrate	Soda lime glass (SLG)
Target to substrate distance	60 mm
Base pressure	3.0×10^{-6} mbar
Operating pressure	6×10^{-3} mbar
Argon	99.9995%
DC Power	550W
Substrate temperature	300 °C
Deposition time	12 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ภาพ AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง Mo ที่เตรียมโดยวิธี DC magnetron sputtering

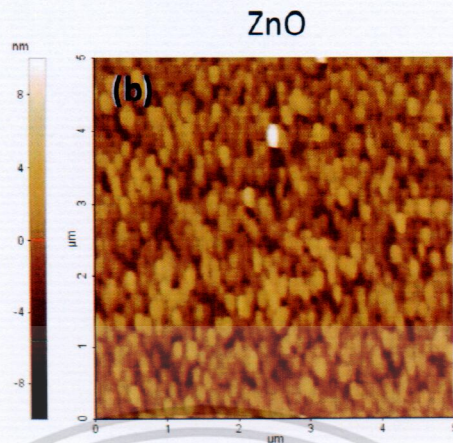
4.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยวิธี RF magnetron sputtering

ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ความหนาประมาณ 50-100 nm ถูกเตรียมลงบนฟิล์มโมลิบดีนัมจากขั้นตอนแรกด้วยวิธี อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มแสดงดังตารางที่ 4.2 ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเรียบในระดับของนาโนเมตรเช่นกัน ลักษณะของเกรนที่แน่นมีขนาดของเกรนแบบวงรีประมาณขนาดความกว้าง 150 nm และความยาว 250 nm และมีค่าความขรุขระประมาณ 1.4 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในการควบคุมความหนาของฟิล์มในแต่ละชั้นใช้การวัดความหนาด้วยวิธี Surface Profiler เพื่อหาอัตราในการเคลือบที่เหมาะสม

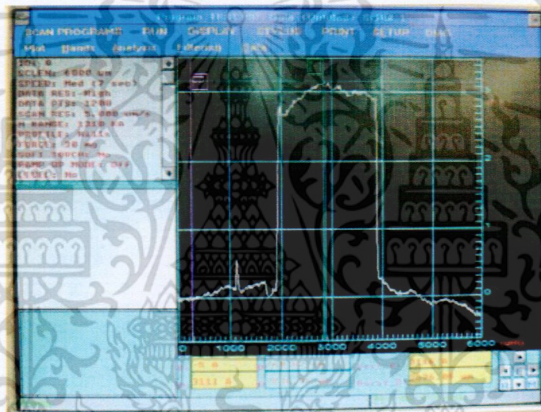
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ZnO ด้วยวิธี RF magnetron sputtering

object	Specification
Target	ZnO Purity (99.995%) 2inch diameter
Substrate	Mo/SLG
Target to substrate distance	50 mm
Base pressure	4.0×10^{-6} mbar
Operating pressure	6×10^{-3} mbar
Argon	99.9995%
RF Power (f=13.56MHz)	80 W
Substrate temperature	No heating
Deposition time	12 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพ AFM ของพื้นผิวฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยเทคนิค RF magnetron sputtering



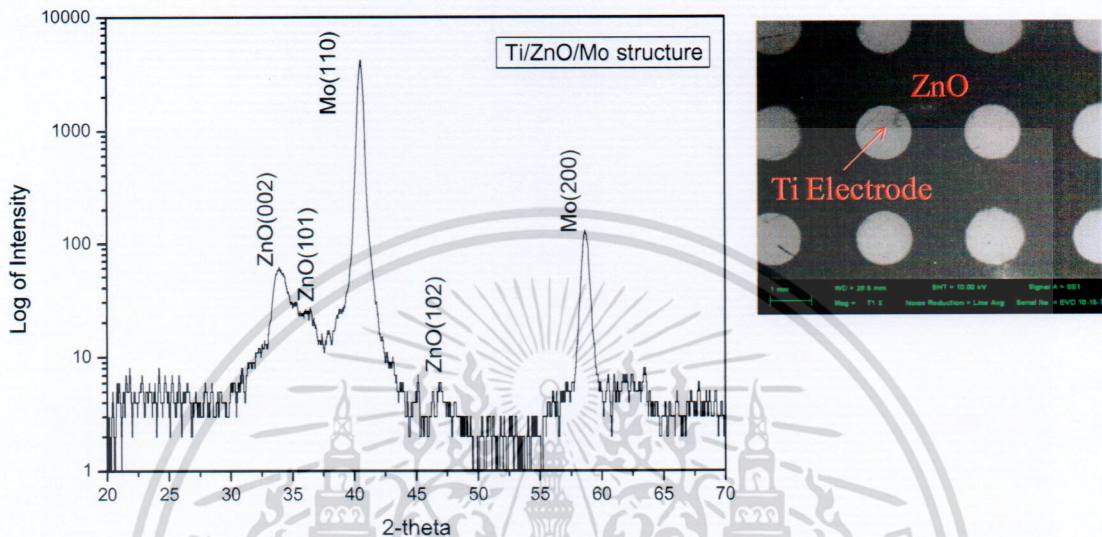
รูปที่ 4.3 ภาพแสดงตัวอย่างผลการวัดความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิค Surface Profiler เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มในแต่ละชั้นได้อย่างเหมาะสม

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของชั้นโลหะ/ฉนวน/โลหะ

คุณลักษณะเชิงโครงสร้างของฟิล์มชั้นโลหะ/ฉนวน/โลหะ ถูกทำการตรวจสอบเพื่อหาเอกลักษณ์ของความเป็นผลึกโดยใช้การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) รูปที่ 4.4(a) แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ฟิล์มโมลิบดีนัมมีโครงสร้างแบบ polycrystalline โดยมีระนาบโดดเด่นที่ (110) และ (200) โดยทำมุม 40.55° และ 58.69° ตามลำดับ ส่วนฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีระนาบโดดเด่นที่ (002) และ (101) โดยทำมุม 33.93° และ 36.42° โดยมุมที่ได้ หากจากการคำนวณพิคโดยใช้การแจกแจงสเปกตรัมแบบ Gaussian นอกจากนี้ยังพบว่า โครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีการขยายตัวของแลตทิซตามแนวแกน c เนื่องจาก lattice mismatch ระหว่างแลตทิซของ Mo และ ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสังเกตจากมุมที่เลื่อนออกไปจากมุมมาตรฐานของ JCPDS 36-1451 ZnO (34.40° และ 36.21°) รูปที่ 4.4b) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ของพื้นผิวฟิล์มซึ่งออกไซด์ และขั้วไฟฟ้าไททาเนียม ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.4 มิลลิเมตร



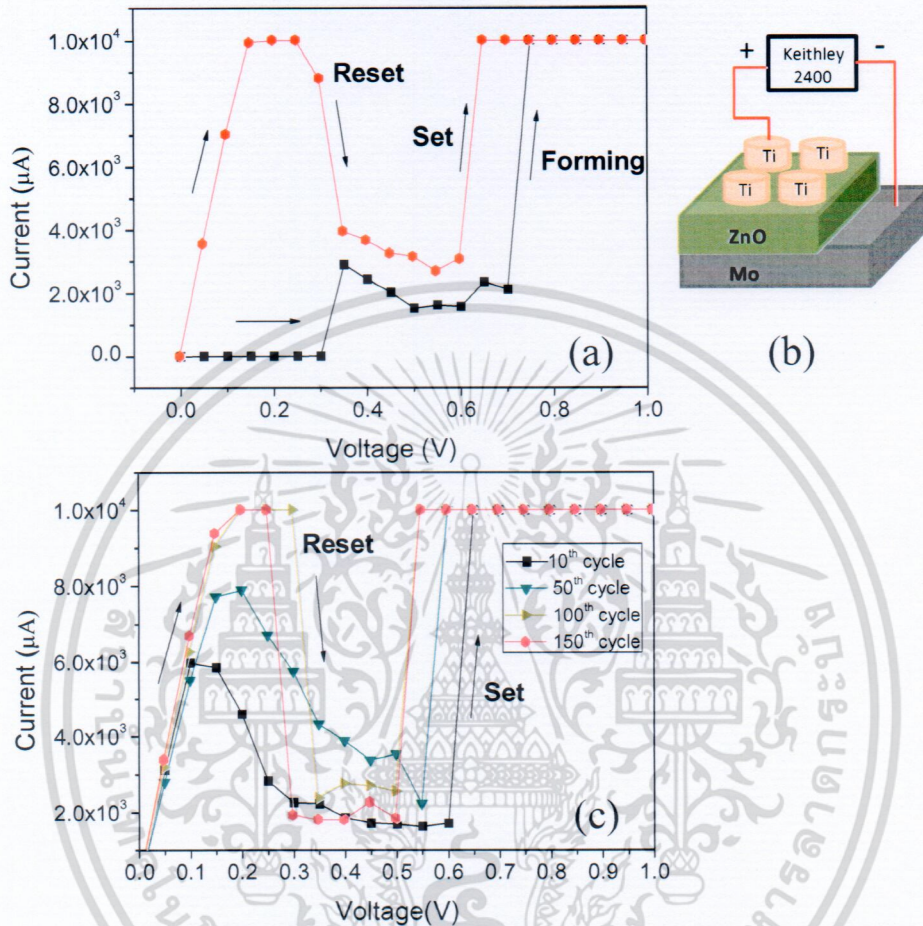
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD spectra) ของโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo บนแผ่นรองรับ กระดาษคาร์บอน และภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

4.4 พฤติกรรมสวิตช์ความต้านทานของโครงสร้าง โลหะ/ฉนวน/โลหะ

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ ของเซลล์สวิตช์ความต้านทาน Ti/ZnO/Mo ที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการวัดที่ได้จะบ่งบอกคุณลักษณะของสวิตช์ความต้านทานและประสิทธิภาพของเซลล์ที่สร้างขึ้นรูปที่ 4.5(a) และ 4.5(c) แสดงผลการวัดทดสอบ ส่วนรูปที่ 4.5(b) แสดงขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับเครื่องจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและวัดค่ากระแสไฟฟ้าเซลล์ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมี forming voltage ประมาณ 0.7V ที่ค่ากระแสสูงสุด (current compliance) เท่ากับ 10mA โดยความต้านทานเปลี่ยนจากสถานะความต้านทานสูง high resistance state (HRS) ไปเป็นสถานะความต้านทานต่ำ low resistance state (LRS) ดังรูปที่ 3(a) เพื่อป้องกันการพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์จะต้องจำกัดค่ากระแสสูงสุดที่ 10 mA หลังจากนั้น หากต้องการเปลี่ยนค่าความต้านทานกลับมายังสถานะเดิมจะต้องทำการ Reset สถานะโดยป้อนค่าความต่างศักย์ประมาณ 0.2-0.3 V (reset voltage) ต่อมาหากต้องการเปลี่ยนค่าความต้านทานกลับไปอีกครั้งจะต้องป้อนความต่างศักย์ในช่วง 0.5-0.6 V ส่วนรูปที่ 4.5(c) แสดงคุณลักษณะของสวิตช์ความต้านทานโดยทำการทดสอบจำนวน 150 รอบ พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีเสถียรภาพดี โดยมีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งความต่างศักย์ลดลงเล็กน้อย ค่าความต้านทานของสถานะความต้านทานสูงและสถานะความต้านทานต่ำ มีความต่างกันประมาณ 1000 เท่า ขอสรุปเบื้องต้นที่ได้จากผลการทดลองพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเซลล์สวิตช์ความต้านทานที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน่วยความจำชนิดไม่ลบเลือน



รูปที่ 4.5 (a) คุณสมบัติของสวิตช์ความต้านทานจากท้าวัดกระแส-ความต่างศักย์ (I-V curve) ของ Ti/ZnO/Mo, ลูกศรแสดงทิศทางการกวาดของกระแส (b) เซลล์สวิตช์ความต้านทานและวิธีการวัดเซลล์ด้วยเครื่อง Keithley 2400, (c) ผลการวัดจำนวน 150 รอบของเซลล์สวิตช์ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการสร้างโครงสร้างโลหะ/ฉนวน/โลหะ (MIM) ซึ่งได้รับการคาดหวังว่าจะนำมาประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์ความต้านทานสำหรับหน่วยความจำเข้าถึงโดยสุ่ม แบบความต้านทาน (RRAM) โดยมีจุดเด่นกว่าหน่วยความจำแบบไม่ลบเลือน (Non volatile memory) ชนิดอื่น ๆ เช่น กินไฟต่ำ, ความเร็วสูง และค่าความจุต่อพื้นที่มาก โครงสร้างที่ประดิษฐ์ขึ้นประกอบไปด้วยชั้นของฟิล์มบาง ไททานเนียม (Ti) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนไฟฟ้า และโมลิบดีนัม (Mo) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง โดยโครงสร้าง Ti/ZnO/Mo ถูกเตรียมลงบนกระจกโซดาลามขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ โดยเทคนิค ดีซี/อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัสเตอริง และควบคุมความหนาของฟิล์ม Ti, ZnO และ Mo ประมาณ 200nm, 50nm and 500nm ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มโมลิบดีนัมมีระนาบโดเด่นที่ (100) และฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีระนาบโดเด่นที่ (002) ลักษณะเชิงกายภาพของฟิล์ม มีพื้นผิวที่เรียบโดยมีความขรุขระในระดับ 1.0 - 1.4 nm เซลล์สวิตช์ความต้านทานมีพฤติกรรมแบบ unipolar resistive switching characteristic และมีประสิทธิภาพในการสวิตช์ภายใน 150 รอบ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ความแตกต่างของสถานะความต้านทานสูง (HRS) และสถานะความต้านทานต่ำ มีค่าประมาณ 10^3 เท่า ค่าความต่างศักย์ในการเปลี่ยนสถานะจาก HRS ไป LRS อยู่ในช่วง 0.50-0.60V โดยใช้ค่ากระแส compliance เท่ากับ 10mA จากผลการทดลองสรุปได้ว่า โครงสร้างใหม่ที่นำเสนอมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสวิตช์ความต้านทานในอุปกรณ์หน่วยความจำชนิดไม่ลบเลือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรมเอกสารอ้างอิง

- [1] J.F. Scott, C.A.P. de Argujo, *Science* 246 1400–1405 (1989).
- [2] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F.N.V. Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* 61 2472–2475 (1988).
- [3] R.E. Simpson, M. Krbal, P. Fons, A.V. Kolobov, J. Tominaga, T. Uruga, H. Tanida, *Nano Lett.* 10 414–419 (2010).
- [4] A. Sawa, *Mater. Today* 11 28–36 (2008).
- [5] R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot, *Adv. Mater.* 21 2632–2663 (2009).
- [6] D. Panda, Tseung-Yuen Tseng, *Thin Solid Films* 531 1–20 (2013).
- [7] F. PAN, C. CHEN, Z. S. WANG, et al., *Progress in Natural Science: Materials International*, 20 1-15 (2010).
- [8] K. SZOT, W. SPEIER, G. BIHLMAYER, et al. *Nature Mater*, 5(4) 312–320 (2006).
- [9] Y. C. YANG, F. PAN, Q. LIU, et al. *Nano Lett*, 9(4) 1636–1643 (2009).
- [10] Y. S. CHEN, T. Y. WU, P. J. TZENG, et al. *Proceedings of Technical Program: International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications*. Hsinchu, 37–8 (2009).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ.	ฟิสิกส์ (เกียรตินิยมฯ 1)	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2545
วทม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2548
วทด.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2553

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) วัสดุศาสตร์, ฟิสิกส์ของฟิล์มบาง.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2553	Best paper award in materials for energy session, MSAT 6, 2010	MTEC & WD
2554	รางวัลจูลมงกุฎ: เกียรติภูมิวิทยา (นิสิตผู้ทำชื่อเสียงแก่คณะวิทยาศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2554	ได้รับคัดเลือกเป็นตัวแทนของประเทศไปประชุม HOPE MEETING ครั้งที่ 3 ณ ประเทศญี่ปุ่น	NSTDA

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2542	ทุนการศึกษา โครงการ พสวท.	สสวท.
2554	ทุนวิจัยเงินรายได้	ว.นวัตกรรม สจล.
2555	ทุนวิจัยเงินรายได้	ว.นวัตกรรม สจล.
2556	ทุนวิจัยเงินรายได้	ว.นวัตกรรม สจล.
2556	ทุนพัฒนานักวิจัยใหม่	กองทุนวิจัย (สจล.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Sakdanuphab, R., Chityuttakan, C., Pankiew, A., Somwang, N., Yoodee, K., Chatraphorn, S. "Growth characteristics of Cu(In,Ga)Se₂ thin films using 3-stage deposition process with a NaF precursor" *Journal of Crystal Growth* **319** (2011) 44-48.
2. Sakdanuphab, R., Chityuttakan, C., Yoodee, K., Chatraphorn, S. "Evolution of Cu(In,Ga)Se₂ thin films using Na precursor in the 3-stage growth process" submitted in *Current Applied Physics* (Special Issue: AMF/AMEC-7).
3. Sakdanuphab, R., Chityuttakan, C., Arthibenyakul, B., Chatraphorn, S. Yoodee, K., "Effect of Ga-graded region to the performance of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ thin film solar cells" *THAI JOURNAL OF PHYSICS Series 3* (2008).
4. Sakdanuphab, R., Chityuttakan, C., Chatraphorn, S. Yoodee, K., "Sodium-enhanced 3-stage growth of CIGS thin film solar cells" *THAI JOURNAL OF PHYSICS Series 4* (2009).
5. Sakdanuphab, R., Chityuttakan, C., Chatraphorn, S. Yoodee, K., "Effects of Se flux on 2-stage growth of Cu(In,Ga)Se₂ thin films solar" *THAI JOURNAL OF PHYSICS Series 5* (2010).
6. Ibuki, C., and Sakdanuphab, R., "Structural, morphological and adhesion properties of CoFeB thin films deposited by DC magnetron sputtering" *Advanced Materials Research* **802** (2013) 47-52.
7. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S. Yoodee, K., "The advantages of Ga-graded obtained by growth profile modification and Na incorporation on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells" *Advanced Materials Research* **936** (2014) 633-638.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Sakdanuphab, R., Chinvetkitvanich, P., Chatraphorn, S., Yoodee, K., and Chityuttakarn, C. "Ga-Graded CIGS Thin Film Absorber Grown By Co-evaporation Method" *The 32nd Congress on Science and Technology Thailand (STT32)*, Bangkok, Thailand, 10-12 October 2006.
2. Sakdanuphab, R., Arthibenyakul, B., Chityuttakarn, C., Chatraphorn, S., and Yoodee, K. "Effect of Ga-graded region to the performance of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ thin film solar cells" *Siam Physics Congress 2007 (SPC 2007)*, Nakorn Pathom, Thailand, 22-24 March 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S., Yoodee, K., and Chityuttakarn, C. "Sodium-enhanced 3-stage growth of CIGS thin film solar cells" Siam Physics Congress 2008 (SPC 2008), Nakorn Ratchasima, Thailand, 20-22 March 2008.
4. Sakdanuphab, R., Chinvetkitvanich, P., Chatraphorn, S., and Chityuttakarn, C. "Effects of Sodium Fluoride precursor in Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells" 5th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT5), Bangkok, Thailand, 16-19 September 2008.
5. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S., Yoodee, K., and Chityuttakarn, C. "Enriching Sodium Fluoride in 3-Stage Growth Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Grown by Molecular Beam Deposition Method" The 34th Congress on Science and Technology Thailand (STT34), Bangkok, Thailand, 31 October – 2 November 2008.
6. Chityuttakarn, C., Chatraphorn, S., and Sakdanuphab, R. "Influence of Ga-Graded to the Performance of CIGS Thin Film Solar Cells" 4th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress 2008 (MPSGC 08), National University of Singapore, Singapore, 17-19 December, 2008.
7. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S., and Chityuttakarn, C. "Effects of Se Flux on 2-Stage Growth of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells" Siam Physics Congress 2009 (SPC 2009), Petchburi, Thailand, 20-22 March 2009.
8. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S., Yoodee, K., and Chityuttakarn, C. "Efficiency Enhancement of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells by NaF Precursor" Siam Physics Congress 2010 (SPC 2010), Kanchanaburi, Thailand, 25-27 March 2010.
9. Sakdanuphab, R., Chinvetkitvanich, P., Chatraphorn, S., Yoodee, K., and Chityuttakarn, C. "Evolution of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films using Na Precursor in the 3-stage Growth Process" 7th Asian Meeting on Ferroelectricity (AMF-7) and the 7th Asian Meeting on Electroceramics (AMEC-7), Jeju island, Korea, 28 June – 1 July 2010.
10. Sakdanuphab, R., Chatraphorn, S., and Chityuttakarn, C. "Development of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells: A Study of NaF Effects on CIGS using Alkaline Diffusion Barrier" 6th Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT6), Bangkok, Thailand, 26-27 August 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้