

การศึกษากระบวนการกัดฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสทินออกไซด์



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study of Etching Process for Conducting Transparent Tin Oxide
Thin Film**



Miss.Thanawal Phanploy
Miss.suteekam Narkwanit

A special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the degree of Bachelor of
Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's of Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การศึกษาระบบการกักฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสทินออกไซด์

นักศึกษา

นางสาว ธนาวัลย์ ปานพลอย

นางสาว สุธีกานต์ นาควานิช

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา


ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.วิษณุ เพชรภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
กรรมการ	ศศ.สาห์ราย	เส็กชะอุม	
กรรมการ	อ.เบญจพล	ตันอู๋	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.วิษณุ	เพชรภา	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษากระบวนการกัดฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสทินออกไซด์

นักศึกษา นางสาว ธนาวัลย์ ปานพลอย
นางสาว สุธิกานต์ นาควานิช

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2549
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิษณุ เพชรภา

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของโครงการพิเศษนี้คือ ศึกษากระบวนการกัดแบบวิถีทางเคมีเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่นำมาศึกษานี้ปลูกด้วยวิธีสปัตเตอร์ซึ่งมีความหนา 900 นาโนเมตร ซึ่งฟิล์มที่นำมาตัดก่อนทำการกัดต้องทำความสะอาดและทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 36% และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.35 โมล ศึกษาการกัดที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ เพื่อดูอัตราการกัดและคุณภาพ ความหนาและอัตราการกัดหาด้วยเทคนิคทางแสง และเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์แบบเล็กราคา ผลที่ได้ปรากฏว่า การกัดที่อุณหภูมิเดียวกันอัตราการกัดด้วยกรดออกซาลิกจะกัดได้สูงกว่าอัตราการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศา ถึง 45 องศา จะทำให้อัตราการกัดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ 30 นาที ถึง 90 นาที ความหนาที่ได้จากการกัดจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมากกว่า 90 นาที ความหนาที่ได้จากการกัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Study of Etching Process for Conducting Transparent Tin Oxide Thin Film

Name Miss.Thanawal Phanploy
Miss.suteekarn Narkwanit

Department Applied Physics

Program Applied Physics

Academic Year 2006

Special Project Advisor Assoc. Prof. Wisanu Pecharapa

ABSTRACT

The main propose of this special project is to develop a suitable wet etching process and characterization of transparent conducting thin films. Tin oxide films was grown on glass substrate by conventional sputtering technique with approximate thickness of 900 nm. The samples were cleaned before etching processes. 36%-HCl acid and 0.35 M-Oxalic acid were selected as etching solvent. Temperature and etching time are two crucial parameters affecting etching rate and etching quality. Etching thickness and etching rate were determined by optical technique and Scanning Electron Microscope. The results revealed that Oxalic acid showed higher etching rate than HCl acid at same temperature. The increasing in etching temperature from 25 °C to 40 °C caused in slowly increasing etching rate. As temperature over 40 °C, the etching rate was rapidly increased. The etching time ranges from 30 min to 90 min caused constant etching rate. Further etching time after 90 min caused considerably increasing etching rate.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

บิดามารดา และผู้ปกครอง	ผู้ให้กำเนิดให้กำลังใจ และความหวังไขเสมอมา
รองศาสตราจารย์ วิษณุ เพชรภา	ผู้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และแนะนำตลอดมา
คณาจารย์ทุกท่าน	ผู้ถ่ายทอดวิชาความรู้มาโดยตลอด
อาจารย์ประเสริฐ มหาวิทยาลัยศิลปากร	สำหรับฟิล์มบางทินออกไซด์ซึ่งเป็นสิ่งจุดประกาย
และบริษัท บางกอกไอโซล่าเซลล์ จำกัด	การทำโครงการพิเศษนี้
เพื่อนๆทุกคน	ผู้ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี
QOS LAB พระจอมเกล้าลาดกระบัง	สำหรับห้องปฏิบัติการเครื่องมือและให้คำแนะนำ
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์	ที่ให้สิ่งดีๆมาโดยตลอด 4 ปี
พระจอมเกล้าลาดกระบัง	

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณทุกๆท่านที่ได้กล่าวนาม และไม่ได้กล่าวนามด้วยความจริงใจ

นางสาว ธนาวัลย์ ปานพลอย
นางสาว สุธิกานต์ นาควานิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 ตัวนำโปร่งแสง	2
2.1.1 สมบัติพื้นฐานของดีบุกออกไซด์ (SnO ₂)	2
2.1.2 สมบัติพื้นฐานของสังกะสีออกไซด์ (ZnO)	3
2.1.3 สมบัติพื้นฐานของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)	4
2.2 การปลูกแผ่นฟิล์ม (Deposition)	8
2.2.1 สเป็คเตอรिंग	9
2.2.3 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกด้วยวิธีการพ่นละอองสารเคมี	11
2.3 การกัดกร่อน	11
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง	14
2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	14
2.4.2 UV-vis Spectrophotometer	17
2.4.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม(AFM)	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 การดำเนินงานในการวิจัยในขั้นตอนการศึกษา	22
3.2 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการทดลอง	22
3.2.1 การล้างฟิล์มบาง	22
3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2.1.2 ขั้นตอนการล้าง	23
3.2.2 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการกัดโดยวิธีทางเคมี	23
3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.2.2.2 เตรียมอุปกรณ์	23
3.2.2.3 วิธีการทดลอง	24
3.3 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้	25
3.3.1 การวัดเพื่อหาค่าความหนาของฟิล์ม ด้วยวิธีการสุดกกลิน ด้วยเครื่อง UV-vis spectrometer	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 ผลการทดลองจากการกัดฟิล์มบาง SnO ₂	27
4.1.1 เงื่อนไขการกัดฟิล์มบาง SnO ₂	28
4.1.2 การคำนวณหาความหนาของฟิล์มหลังจากการกัด	28
4.2 ผลของการวัดด้วย UV-vis spectrometer	30
4.3 ผลจากการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂	34
4.4 ผลจากการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้	37
4.5 ผลจากการคำนวณหาอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO ₂	39
4.6 การวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด(SEM)	45
4.7 ผลจากการหาความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้	51
4.8 ผลจากการหาอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO ₂	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 การวิเคราะห์ผลพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง AFM	55
4.9.1 ผลที่ได้จากการกัดฟิล์มบางทินออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เปรียบเทียบกับ การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) อุณหภูมิต่างๆ	55
4.9.2 ผลที่ได้จากการกัดฟิล์มบางทินออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เปรียบเทียบกับ การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) อุณหภูมิต่างๆ	58
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	69
5.1 สรุปผลการศึกษาโครงการพิเศษ	69
5.2 แนวทางในการพัฒนา	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลของ SnO ₂	3
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบของ ZnO	4
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Cubic bixbyte ของ ITO	5
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างอะตอมของอินเดียมออกไซด์ (In ₂ O ₃) ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn)	6
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแถบพลังงานที่มีลักษณะเป็นพาราโบลาของ In ₂ O ₃ ที่ยังไม่ได้รับการเจือและผลกระทบของการเจือด้วย Sn	6
รูปที่ 2.6 ระบบเครื่องมือสเปกโตรสโกปี	10
รูปที่ 2.7 โพรไฟล์การกักความร้อน	12
รูปที่ 2.8 การกักความร้อนแบบปฏิกิริยาพลาสมา (reactive plasma)	14
รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	15
รูปที่ 2.10 ภาพแสดงหลักการการทำงานของเครื่อง SEM	15
รูปที่ 2.11 UV-Vis สเปกโตรมิเตอร์	18
รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบที่แสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน	18
รูปที่ 2.13 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง	20
รูปที่ 2.14 ลักษณะการสั่นของคาน	20
รูปที่ 2.15 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอม	21
รูปที่ 3.1 แสดงสมการ Beer-Lambard	26
รูปที่ 4.1 แสดงการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂	27
รูปที่ 4.2 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ก่อนการกักด้วยเครื่อง SEM	28
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO ₂ ชุดที่ 1	30
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO ₂ ชุดที่ 2	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO ₂ ชุดที่ 3	32
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO ₂ ชุดที่ 4	33
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาต่างๆของชุดที่ 1 และ 2	35
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4	36
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ 2	37
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4	38
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิต่างๆเป็นผลการวัดด้วยเครื่อง Uv-visible	39
รูปที่ 4.12 รูปแสดงความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ก่อนการกัดด้วยเครื่อง SEM	40
รูปที่ 4.13 รูปแสดงความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ หลังจากการกัดด้วยกรด HCl ที่อุณหภูมิต่างๆ	41
รูปที่ 4.14 รูปแสดงความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ หลังจากการกัดด้วยกรด Oxalic ที่อุณหภูมิต่างๆ	43
รูปที่ 4.15 รูปแสดงความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ หลังจากการกัดด้วยกรด HCl ที่เวลาต่างๆ	45
รูปที่ 4.16 รูปแสดงความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ หลังจากการกัดด้วยกรด Oxalic ที่อุณหภูมิต่างๆ	47
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาต่างๆของชุดที่ 1 และ 2	49
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4	50
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ 2	51
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 3 และ 4	52
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิต่างๆเป็นผลการวัดด้วยเครื่อง SEM	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงอัตราการกัดและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกัดที่ HCl 9 โมล และ aqua regia 9 โมล	54
รูปที่ 4.23 สภาพพื้นผิวพื้นผิวของฟิล์มบางที่ออกไซด์ที่ยังไม่ได้กัด	55
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 25°C	55
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 30°C	56
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 35°C	56
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 40 °C	57
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 45°C	57
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่เวลา 30 นาที	58
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่เวลา 60 นาที	58
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่เวลา 90 นาที	59
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่เวลา 120 นาที	59
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบสภาพพื้นผิวระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่เวลา 150 นาที	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ SnO ₂	2
ตารางที่ 2.2	แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ ZnO	3
ตารางที่ 2.3	แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ ITO	4
ตารางที่ 2.4	แสดงสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ	8
ตารางที่ 4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกัดฟิล์มบาง SnO ₂	28
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂	34
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้	37
ตารางที่ 4.4	แสดงอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO ₂	39
ตารางที่ 4.5	แสดงผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂	49
ตารางที่ 4.6	แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้	51
ตารางที่ 4.7	แสดงอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO ₂	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันทั่วไป เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงมีคุณสมบัติคือ สามารถส่งแสงผ่านในช่วงที่ตามองเห็นได้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และไม่ส่งผ่านรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อน จากสมบัติเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของจอแอลซีดี, เซลล์แสงอาทิตย์, กระจกสะท้อนความร้อน และฟิล์มสะท้อนรังสีความร้อน

ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงสามารถประดิษฐ์ได้จากสารประกอบหลายชนิดด้วยกันเช่น อินเดียมออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุก($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$), ดีบุกออกไซด์(SnO_2), ดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยพลวง($\text{SnO}_2:\text{Sb}$), ดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน($\text{SnO}_2:\text{F}$), สังกะสีออกไซด์(ZnO) และสังกะสีออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม($\text{ZnO}:\text{Al}$) เป็นต้น การสร้างขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการ และการออกแบบขั้ว

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการกัดฟิล์มบางเพื่อประดิษฐ์เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งใสของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาวิธีการกัดฟิล์มบางโปร่งใสทินออกไซด์(SnO_2) เพื่อหาความเหมาะสมที่ใช้ในการกัดฟิล์มบางโปร่งใสทินออกไซด์(SnO_2)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เราจะศึกษากระบวนการกัดฟิล์มบางโปร่งใสทินออกไซด์(SnO_2)

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาวิธีการทำความสะอาดฟิล์มบางโปร่งใสทินออกไซด์(SnO_2)

1.4.3 ศึกษาวิธีการกัดฟิล์มบางโปร่งใสทินออกไซด์(SnO_2)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการกัด

1.5.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์เช่น สมบัติทางไฟฟ้าและแสง ของฟิล์มบางเพื่อหาความเหมาะสมที่ใช้ในการกัดฟิล์มบางแล้วนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งใส

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวนำโปร่งแสง

2.1.1 สมบัติพื้นฐานของทินออกไซด์(SnO_2)

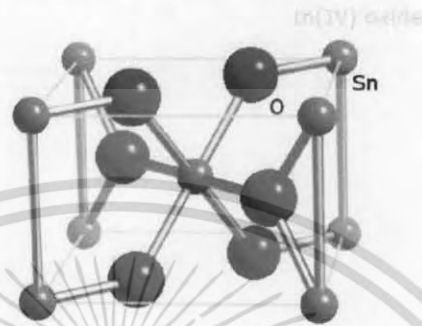
ดีบุก (Sn) เป็นธาตุในหมู่ 4 ของตารางธาตุ สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นดีบุกไอออน (Sn^{2+} , Sn^{4+}) และรวมตัวกับสารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน หรือคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบขึ้น ทินออกไซด์ (SnO_2) จะมีสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ SnO_2

สมบัติของสาร	SnO_2
มวลโมเลกุล (g/mol)	150.6888
โครงสร้าง	เตตระโกนอล
ความหนาแน่น ($\times 10^3 \text{ kg/cm}^3$)	6.55
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดเดือด	2,000
จุดหลอมเหลว	1,625
พลังงานที่ใช้ในการเกิดเป็นสารประกอบ	520.000
พลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้	581.128
พลังงานในการสลายพันธะ	580.709
พลังงานของโครงผลึก	1,186.7018
สภาพต้านทานไฟฟ้า(-cm)	4×10^6 (20 C) 60 (1200 C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SnO_2 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล ดังรูปที่ 2.1 คือประกอบด้วย Sn_2 อะตอม และ O_4 อะตอม โดยมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบบโควาเลนต์ หรือแบบเตตระไฮดรอน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลของ SnO_2

2.1.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

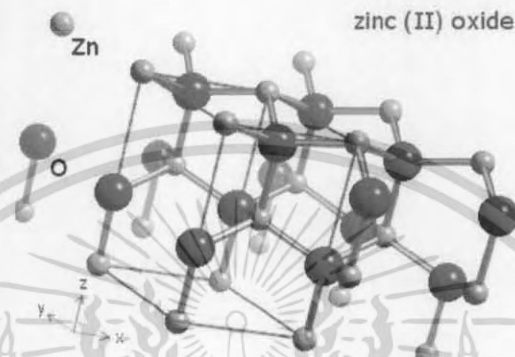
สังกะสี (Zn) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ และรวมตัวกับสารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจน หรือคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบซิงค์ (ZnO) จะมีสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ ZnO

สมบัติของสาร	ZnO
มวลโมเลกุล (g/mol)	81.389
โครงสร้าง	Wurtzite
ความหนาแน่น ($\times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$)	5.6
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดเดือด	1800
จุดหลอมเหลว	2248
พลังงานในการสลายพันธะ(meV)	60
พลังงานของโครงสร้าง(eV)	1.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล ดังรูปที่ 2.2 คือประกอบด้วย Zn อะตอม และ O อะตอม โดยมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบบโควาเลนต์ หรือแบบเตตระฮีดรอน



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบของ ZnO

2.1.3 สมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)

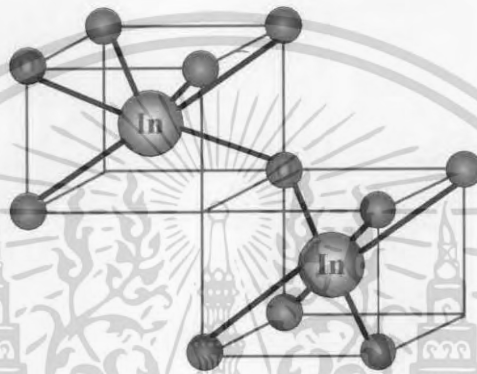
ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบ ITO

สมบัติของสาร	ITO
มวลโมเลกุล (g/mol)	277.634
โครงสร้าง	cubic bixbyte
ความหนาแน่น ($\times 10^{-3}$ kg/cm ³)	7.14
สถานะ	ของแข็ง
สี	เหลือง
จุดเดือด	-
จุดหลอมเหลว	1,900
สภาพต้านทานไฟฟ้า(-cm)	ต่ำและขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1). โครงสร้างของฟิล์มบาง ITO

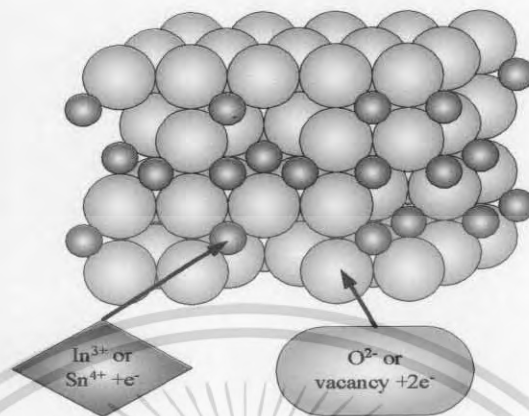
อินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) คือ สารอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ที่ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn) Sn จะเข้าไปแทนที่ In^{3+} โดยที่โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็น In_2O_3 แต่อะตอมบางตัวของ In ถูกแทนที่ด้วย Sn ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกแบบ cubic bixbyte ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Cubic bixbyte ของ ITO

เมื่อดีบุกเข้าไปสร้างพันธะระหว่างออกซิเจนจะทำให้เกิดการเป็นทินออกไซด์แบบ SnO โดยที่ดีบุกจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 หรือ SnO_2 ซึ่งดีบุกจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +4 ค่าเวเลนซ์อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ โดยที่ SnO ซึ่งมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนต่ำกว่าคือเท่ากับ +2 จะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลงเนื่องจากมีโฮลเกิดขึ้นซึ่งทำให้สภาพความนำไฟฟ้าลดลง และในทางกลับกันถ้าทินออกไซด์ของ SnO_2 ซึ่งมีเวเลนซ์เท่ากับ +4 ซึ่งทำหน้าที่เป็น สารเจือชนิดอื่น (n-type) โดยที่ In^{3+} ถูกแทนที่ด้วย $\text{Sn}^{4+} + e^-$ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.4 ทำให้มีอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเกิดช่องว่างของออกซิเจนซึ่งมีผลทำให้สภาพความนำไฟฟ้าดีขึ้นและมีสูตรเป็น $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

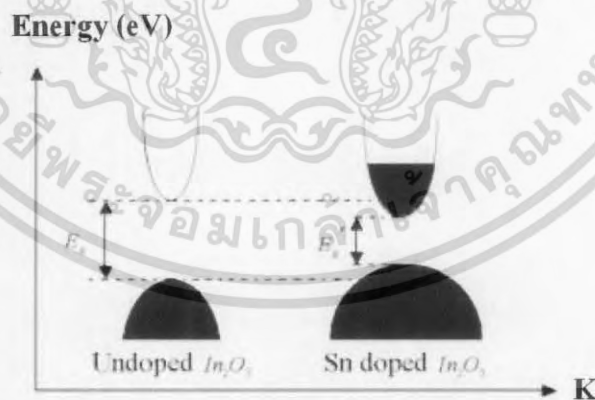


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างอะตอมของอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn)

2). สมบัติทางแสง

อินเดียมทินออกไซด์ มีแถบพลังงานค้ำห้ามแบบตรง (direct band gap) อยู่ระหว่าง 3.5 - 4.3 eV มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1900 °C มีความหนาแน่น 7.14 g/cm³ โดยที่มีความสามารถในการส่งผ่านแสงที่สูง เนื่องจากกรที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานค้ำห้ามที่กว้าง (Wide band gap) โดยที่ช่วงการดูดกลืนแสงจะอยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra violet)

โครงสร้างแถบพลังงานของอินเดียมทินออกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นพาราโบลา ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแถบพลังงานที่มีลักษณะเป็นพาราโบลาของ In_2O_3 ที่ยังไม่ได้รับการเจือและผลกระทบของการเจือด้วย Sn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแถบความนำ (conduction band) คือเส้นโค้งที่อยู่ข้างบน ส่วนแถบวาเลนซ์ (valance band) คือเส้นโค้งที่อยู่ด้านล่าง ในกรณีที่ไม่มีสารเจือ Sn ลงไประดับเฟอร์มี (Fermi Level) จะอยู่บริเวณตรงกลางของช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อได้รับการเจือด้วย Sn จะเกิดการฟอร์มตัวของสถานะของผู้ให้ (Donor Level) ซึ่งอยู่ต่ำกว่าแถบความนำและถ้ามีความหนาแน่นของการเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้สถานะของผู้ให้อยู่ในระดับเดียวกันกับแถบความนำและเรียกความหนาแน่นของการเจือดังกล่าวว่าความหนาแน่นวิกฤติ (Critical density) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.3×10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์ของอินทรีบายได้ดังนี้ ภายในวัสดุเมื่อมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากอะตอมของผู้ให้ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของความหนาแน่นวิกฤติ จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าค่าของความหนาแน่นของพาหะทั้งหมดของเทคนิคต่างๆ มีค่ามากกว่าความหนาแน่นวิกฤติ ด้วยเหตุนี้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ทั้งหมดถูกกล่าวหาว่าเป็นสารกึ่งตัวนำแบบดีเจนเนอเรต (Degenerate Semiconductor) ในธรรมชาติ ซึ่งการที่วัสดุจะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำแบบดีเจนเนอเรต ได้นั้นจะต้องมีแรงระหว่างประจุซึ่งทำให้แถบความนำเกิดการเลื่อนที่ลงต่ำกว่าเดิมส่วนในแถบวาเลนซ์จะมีการเลื่อนที่สูงกว่าเดิมทำให้แถบช่องว่างพลังงานแคบกว่าเดิมจาก E_g เป็น E_g' ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยที่แถบช่องว่างพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดย Burstein-Moss shift ซึ่งถูกทดแทนด้วยผลกระทบดังกล่าว

3). สมบัติทางไฟฟ้า

อินเดียมทินออกไซด์ มีความนำไฟฟ้า (Conductivity) สูงเนื่องมาจากการที่มีค่าความเข้มข้นของพาหะที่สูงมากกว่าค่าฮอลล์โมบิลิตี (Hall mobility) และพบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ จะส่งผลทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นอีกด้วย โดยที่ในตารางที่ 2.4 จะแสดงให้เห็นถึงสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าจะให้ผลต่างกัน

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้จากการปลูกฟิล์มบางอินเดียมทิน ออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ

Deposition Technique	Thickness [\AA]	Hall Mobility μH [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$]	Carriers N [cm^{-3}]	Resistivity ρ [Wcm]	Transmittance Tr [%]
r.f. Sputtering	7000	35	6×10^{20}	3×10^{-4}	90
Magnetron Sputtering	800	26	6×10^{20}	4×10^{-4}	85
d.c. Sputtering	100	35	9×10^{20}	2×10^{-4}	85
Reactive Evaporation	25002	30	5×10^{20}	4×10^{-4}	91
Ion Beam Sputtering	600	26	2×10^{20}	12×10^{-4}	-
Spray Pyrolysis	3000	45	5×10^{20}	3×10^{-4}	85

2.2 การปลูกแผ่นฟิล์ม (Deposition)

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงกรรมวิธีต่างๆ ในการปลูกฟิล์มบางของวัสดุบางชนิดลงบนผิวหน้า แว่นผลึกซึ่งกรรมวิธีต่างๆ นี้อาจมีการคาบเกี่ยวกันอยู่บ้าง อย่างเช่น เทคนิคอีพิแทกซีแบบสถานะไอ [vapour phase epitaxy (VPE)] จะเป็นกรณีเฉพาะของการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคการสร้างชั้นสารจากไอ สารเคมี อย่างไรก็ตามการแยกประเภทของการปลูกฟิล์มในที่นี้ จะยึดตามลักษณะการแบ่งประเภทของอุปกรณ์เป็นหลัก มากกว่าที่จะแบ่งตามหลักการทางกายภาพที่ใช้ แผ่นฟิล์มที่ปลูกในกระบวนการผลิตไอซีนั้นมีหลายประเภท ได้แก่ ฟิล์มของสารอินทรีย์ ฟิล์มของ สารอนินทรีย์ แผ่นฟิล์มโคอีเล็กทริก แผ่นฟิล์มสารกึ่งตัวนำ และแผ่นฟิล์มตัวนำ โดยจะแบ่งการอธิบายเทคนิคการปลูกฟิล์มต่าง ๆ ดังนี้

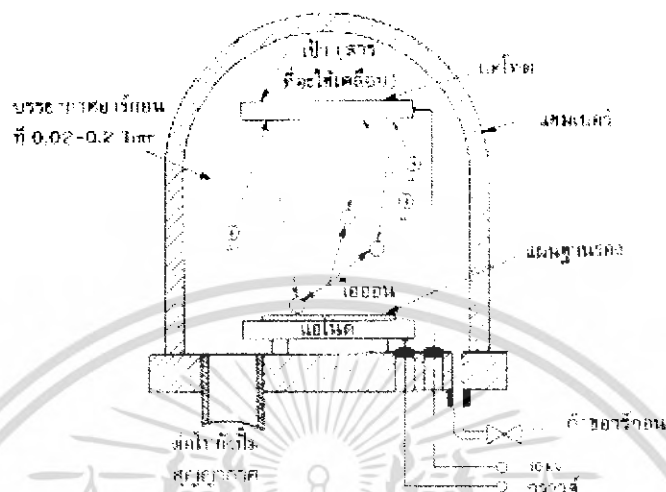
1. สปีดเตอริง (sputtering) : เป็นเทคนิคการปลูกฟิล์มที่เป็นโลหะและฉนวน
2. การพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) : เป็นเทคนิคการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการพ่นละอองสารเคมีบนกระจกที่อยู่ในสถานะสมดุลความร้อน

กรรมวิธีแบบที่ 1 นั้นจะต้องกระทำภายในแชมเบอร์ที่มีการดึงความดันลงต่ำมาก ทั้งนี้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดออกซิเดชันขึ้นในระหว่างการปลูกฟิล์ม ด้วยเหตุนี้เครื่องมือที่ใช้ในกรรมวิธีเหล่านี้จึงต้องมีระบบสุญญากาศเข้ามาช่วยเพื่อช่วยดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ให้มีความดันต่ำ

ความดันรวมในระหว่างการปลูกฟิล์มก็เป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญอีกแฟกเตอร์หนึ่งที่ช่วยควบคุมคุณภาพของฟิล์ม โดยแฟกเตอร์นี้จะมีผลต่อระยะทางเฉลี่ยปลดการชน (ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความดัน) ของอนุภาคก๊าซ นอกจากนี้รูปทรงทางเรขาคณิตของตัวแชมเบอร์เองก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการปลูกฟิล์ม

2.2.1 สปีดเตอริง

สปีดเตอริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสปีดเตอริง (แบบคิซี ซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด) แสดงดังในรูปที่ 2.6 ในระบบนี้แผ่นฐานรองจะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์ม (อุณหภูมิ $\approx 150 - 250^{\circ}\text{C}$) และทางขั้วแคโทดจะมีเป้า ซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ (หรือ belljar) จนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ (background pressure อยู่ในช่วง $10^{-5} - 10^{-6}$ Torr) จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงไว้ระหว่างขั้วแอโนด – แคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย (มักใช้ Ar เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า) ที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการ (อยู่ในช่วง 0.02 – 0.2 Torr) หลังจากนั้น Ar จะแตกตัวเป็นไอออนอันเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ใช้ทำเป้า จึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุคั่งก่อกว่หลุดจากผิวหน้าเป้าม่าฝากหรือเคลือบลงบนแผ่นฐานรอง เนื่องจากในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มความดันภายในแชมเบอร์มีค่าต่ำ ดังนั้น เมื่ออะตอมของวัสดุหลุดจากผิวหน้าเป้าม่าแล้วจะมีโอกาสชนกันเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยก่อนที่จะฝากลงบนผิวหน้าฐานรอง ด้วยเหตุนี้ชั้นฟิล์มที่ปลูกได้จึงอาจมีลักษณะคล้ายกับการฉาบไอระเหยของโลหะ นั่นคือ มีลักษณะสเกลคอปเวอร์เรจเกิดขึ้น ซึ่งวิธีที่ช่วยลดการเกิดสเกลคอปเวอร์เรจ สามารถกระทำได้โดยการใช้แผ่นเป้าม่าที่มีหน้าตัดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.6 ระบบเครื่องมือสปีดเตอริง

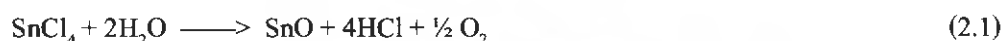
เทคนิคสปีดเตอริงสามารถใช้กับวัสดุใด ๆ ก็ได้ รวมทั้งโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำที่มีจุดหลอมละลายสูง นอกจากนี้ยังสามารถทำการสปีดเตอริงพวกสารประกอบและอัลลอยได้ แม้ว่าการควบคุมองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นสารประกอบจะกระทำได้ลำบากอันเนื่องจากอัตราการสปีดเตอริงที่แตกต่างกันของส่วนประกอบของสาร ในปัจจุบันเทคนิคสปีดเตอริงมักนิยมใช้กับการปลูกฟิล์มโลหะเป็นหลักสำหรับเครื่องมือสปีดเตอริงที่ใช้โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

- (ก) ดีซีหรืออาร์เอฟสปีดเตอริง (dc หรือ rf sputtering): ถ้าเป้าที่ใช้เป็นวัสดุนำไฟฟ้าสามารถใช้เครื่องมือทั้งสองประเภทได้ แต่ถ้าเป้าเป็นพวกสารไดอิเล็กตริกจะต้องใช้การกระตุ้นแบบอาร์เอฟ
- (ข) แมกนีตรอนสปีดเตอริง (magnetron sputtering): จะมีการวางแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไว้ข้างหลังเป้า เพื่อทำหน้าที่ช่วยบังคับพลาสมาที่มีอะตอมของวัสดุให้ฝากลงบนผิวหน้าแผ่นฐานรองได้ดีขึ้น และเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการฝาก
- (ค) รีแอคทีฟสปีดเตอริง (reactive sputtering): ก๊าซปฏิกิริยาบางชนิดสามารถเติมเข้ามาในพลาสมาได้เพื่อช่วยปลูกฟิล์มของวัสดุที่ต้องการ อย่างเช่น ถ้าต้องการปลูกฟิล์มติทานเนียมไนไตรด์ สามารถกระทำได้โดยการสปีดเตอริงติทานเนียมในบรรยากาศของไนโตรเจนที่ผสมกับก๊าซเฉื่อย

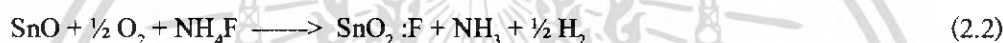
2.2.2 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกด้วยวิธีพ่นละอองสารเคมี

1). กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในสารละลาย

ในการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นละอองสารเคมี สารตั้งต้นที่เป็นสารละลายจะอยู่ในรูปพอลิเมอร์ Sn-O ซึ่งกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเป็นไปตามสมการที่ (2.1)



กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) อะตอมของฟลูออรีนจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนบางตัวในโมเลกุลของ SnO₂ จะทำให้เกิดเป็น SnO₂:F การเกิดปฏิกิริยานี้จะเขียนไปตามสมการที่ (2.2)



2). กระบวนการเกิดฟิล์มบาง

เมื่อสารละลายถูกทำให้กลายเป็นไอและพ่นเข้าในภาชนะที่เคลือบด้วยสารเคลือบ โดยวิธีการใช้อัลตราโซนิก เมื่อหยดของสารละลายเข้าใกล้ฐานรองรับมากขึ้น อุณหภูมิบริเวณใกล้กับฐานรองรับก็จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีการให้ความร้อนกับฐานรองรับ ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ขนาดของหยดของสารละลายมีขนาดเล็กลงด้วย เนื่องจากเมื่อหยดของสารละลายได้รับความร้อนจะทำให้สารละลายบางส่วนมีการระเหยออกไปทำให้หยดของสารละลายมีขนาดเล็กลง

เมื่อหยดของสารละลายตกลงบนพื้นผิวของฐานรองรับ หยดของสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำ (dehydration) และจะเกาะกับฐานรองรับ เมื่อปริมาณหยดของสารละลายที่จับบนพื้นผิวของฐานรองรับมีปริมาณมากพอ และยังได้รับความร้อนจากแผ่นฐานรองรับทำให้หยดของสารละลายที่เกาะบนพื้นผิวของฐานรองรับเกิดการเชื่อมต่อกัน เมื่อมีปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อฟิล์ม

2.3 การกัดกร่อน

การกัดกร่อนคือ การกัดกร่อนหรือลอกวัสดุออก อย่างเช่น พกออกไซด์หรือฟิล์มบางอื่นๆ โดยวิธีทางเคมี อิเล็กโตรไลติก หรือการระดมยิงด้วยพลาสมา-ไอออน(plasma-ion bombardment) หลังจากที่แพตเทิร์นที่ออกแบบได้ถูกถ่ายแบบจากโฟโตมาสก์ลงบนน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องมีการลอกหรือกัดชั้นฟิล์มที่ถูกปกคลุมด้วยน้ำยาไวแสงออกบางส่วน ณ บริเวณที่กำหนด ซึ่งชั้นฟิล์มดังกล่าวอาจเป็นออกไซด์ ไนไตรด์ โพลีซิลิคอน อะลูมิเนียม หรืออาจเป็นชั้นซิลิคอนสลิคเค์ชาก็ได้ โดยที่ชั้นน้ำยาไวแสงยังคงอยู่

หลังจากผ่านกระบวนการกัดกร่อน และจะทำหน้าที่ป้องกันบริเวณชั้นฟิล์มที่อยู่ข้างใต้ โดยทั่วไป กระบวนการกัดกร่อนจะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ต่อไปนี้คือ

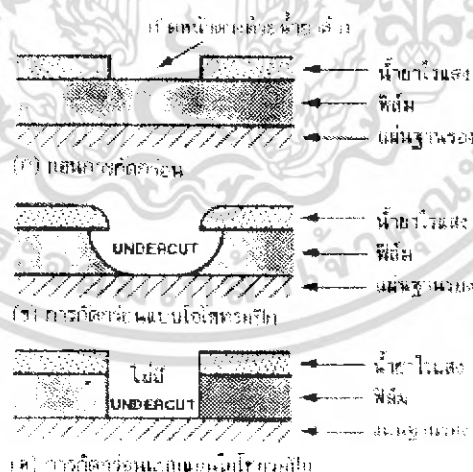
(ก) การกัดกร่อนนั้นเป็นแบบไอโซทรอปิก (isotropic เป็นการกัดกร่อนที่เหมือนกันในทุกทิศทาง) หรือ แอนไอโซทรอปิก (anisotropic เป็นการกัดกร่อนในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง) การกัดกร่อนทั้งสองแบบ

(ข) การกัดกร่อนเป็นแบบเลือกเฟ้น (selective) หรือไม่ หมายความว่าสารที่ใช้กัดกร่อนจะกัดชั้นหน้าปก และชั้นอื่น ๆ ด้วยอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าชั้นที่จะกัดมากน้อยเพียงใด

(ค) อัตราการกัดกร่อนมีความสม่ำเสมอเพียงใดตลอดพื้นที่ผิวหน้าแว่นผลึก

(ง) หลังจากการกัดกร่อนแล้ว ชั้นที่อยู่ข้างใต้มีความเสียหายเกิดขึ้นหรือไม่

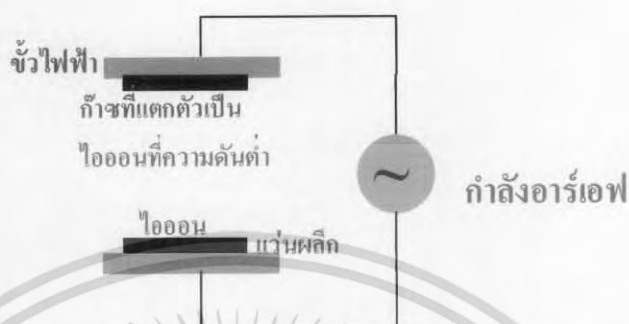
สารที่ใช้ในการกัดกร่อนในเทคโนโลยีการผลิตไอซีเป็นตัวแรกคือ สารเคมีพวกกรดบัพเฟอร์ อย่างเช่น buffered HF ซึ่งใช้ในการกัดกร่อน SiO_2 และแก้ว การกัดด้วยสารเคมีประเภทเหล่านี้เรียกว่า เป็นการกัดกร่อนแบบเปียก (wet etching) ซึ่งทำให้บริเวณที่ถูกกัดกร่อนมีลักษณะไอโซทรอปิก และเกิดเป็นลักษณะ undercut อย่างมากข้างใต้แผ่นหน้าปก (ในที่นี้คือ ชั้นน้ำยาไวแสง) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข) ลักษณะผิวหน้าที่กัดกร่อนด้วยน้ำยาเคมีจะขึ้นกับอุณหภูมิและอายุการใช้งานของส่วนผสมน้ำยากัดกร่อน เมื่อไรก็ตามที่ขนาดสิ่งประดิษฐ์ (device feture) หรือ



รูปที่ 2.7 โปรไฟล์การกัดกร่อน (ก) ก่อนการกัดกร่อน (ข) การกัดกร่อนแบบไอโซทรอปิกใช้วิธี การกัดกร่อนแบบเปียก (ค) การกัดกร่อนแบบแอนไอโซทรอปิกใช้วิธี การกัดกร่อนแบบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดพีเชอร์ของวงจรรวมที่ต้องการผลิตและการเปิดหน้ากากหรือหน้าต่างเพื่อทำการกัดกร่อนมีขนาดเล็ก ลง จะต้องหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนด้วยน้ำยาเคมี ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาการกัดกร่อนโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของโมเลกุลก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนหรือพลาสมาเข้ามาช่วย ซึ่งเรียกว่า การกัดกร่อนแบบแห้ง (dry etching) กระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.8 โดยการใช้ก๊าซชนิดอย่างเช่น CF_4 , CF_6 , CCl_4 และ O_2 (การใช้ก๊าซแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการกัดกร่อนชั้นฟิล์มชนิดใด) ป้อนเข้ามาในแชมเบอร์ปฏิกิริยา (reaction chamber) ซึ่งลดความดันลงเหลือประมาณ 0.01-0.1 Torr จากนั้นป้อนกำลังอาร์เอฟให้ระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะ 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งเป็นแอโนดซึ่งต่อลงดิน และอีกขั้วหนึ่งเป็นแคโทดซึ่งแว่นผลึกจะวางอยู่บนขั้วนี้ แรงดันอาร์เอฟจะทำให้เกิดการดีสซาร์จที่ค่าความดันก๊าซต่ำ และทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุเป็นลบและไอออนบวกของฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) หรือคลอโรคาร์บอน (chlorocarbon) ทั้งนี้แล้วแต่กรณี วงจรไฟฟ้าที่ใช้จะถูกออกแบบเพื่อให้แคโทดมีศักย์เป็นลบ ซึ่งทำให้ไอออนบวกเคลื่อนที่เร่งตรงมายังขั้วแคโทดและวิ่งชนผิวหน้าแว่นผลึกอย่างแรงและหากศักย์ไฟตรงโดยเฉลี่ยของแคโทดมีค่าต่ำ จะทำให้การกัดกร่อนส่วนใหญ่เป็นแบบไอโซทรอปิก ชนิดของสารเจือที่ใส่ก็จะทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มที่ถูกกัดและทำให้เกิดเป็นสารประกอบซึ่งระเหยเป็นไอออกจากแชมเบอร์ไปพร้อมกับก๊าซพา ในกรณีที่แคโทดมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมาก การวิ่งชนของไอออนอย่างแรงจะทำให้เกิดความเสียหายบนผิวหน้าสารด้วย ลักษณะเช่นนี้จะเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาเคมีในทิศทางที่ไอออนวิ่งชนผิวหน้าสาร ยังผลให้การกัดกร่อนมีความเป็นแอนไอโซทรอปิกมากขึ้น ๆ ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่าการกัดกร่อนด้วยไอออนปฏิกิริยา [reactive ion etch (RIE)] และใช้เป็นเทคนิคในการขุดชั้นร่อง (trench) ที่ลึก ($\approx 2 \mu m$) ใน Si ในกระบวนการผลิตไอซี โดยที่ชั้นร่องนี้จะมีการปลูกชั้นออกไซด์เติมลงไปเพื่อใช้เป็นการแยกโดดตัวสิ่งประดิษฐ์ในลำดับต่อไป หรือใช้สร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพื้นที่ใหญ่ (ในหน่วยวงจรรวม) กิ่งค่าน้ำที่มีความหนาแน่นสูง) โดยไม่ต้องเสียพื้นที่ที่ผิวหน้าสารมาก



รูปที่ 2.8 การกักครองแบบปฏิกิริยาพลาสมา (reactive plasma)

ข้อเสียของกระบวนการ RIE ก็คือ ความเสียหายจากการแผ่พลังงานซึ่งเกิดจากการระดมยิงชนิดของสารเจืออย่างแรงจึงทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนฝังบนผิวหน้าซึ่งกินความลึกในระดับ 100 nm ลักษณะเช่นนี้จะเป็นการเพิ่มสเตตที่ผิว เพิ่มศูนย์กลางการจับ และเพิ่มประจุออกไซด์บวก และอาจทำให้ออกไซด์เกิดการทลายก่อนถึงแรงดันอันควร ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในระหว่างกระบวนการ RIE เพื่อพยายามลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น และในบางครั้งอาจต้องมีการนำแวนผลึกไปแอนนีสที่อุณหภูมิสูงหลังจากผ่านกระบวนการกักครอง

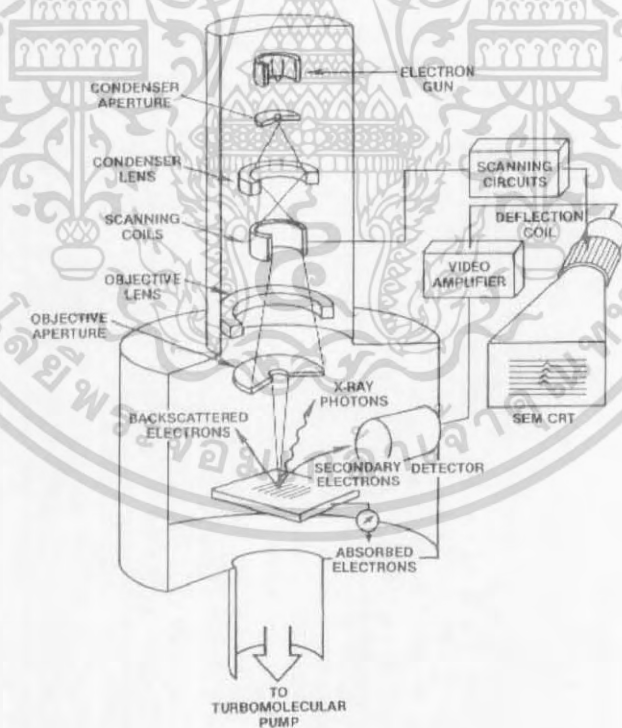
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างแล้วแสดงภาพไปบนจอ cathode ray tube (CRT) ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะขาว-ดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่าขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบหลักและการทำงานโดยสังเขปของเครื่อง SEM แสดงไว้ในภาพที่ 2.10 ส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source) หรือ “ปืนอิเล็กตรอน (electron gun)” ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน ซึ่งนับว่าเป็นหัวใจของ SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งภายในมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ช่วง 0 – 30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยแอปเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆ กันตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (first condenser lens) อาจนับได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ “บีบ” ลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กกลง (demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดภาพ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในระนาบ x – y คล้ายกับการกวาดภาพบนจอโทรทัศน์ สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือ การเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาค่าของชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมียุทธศาสตร์ต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบอัสไว้จะเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสงและถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

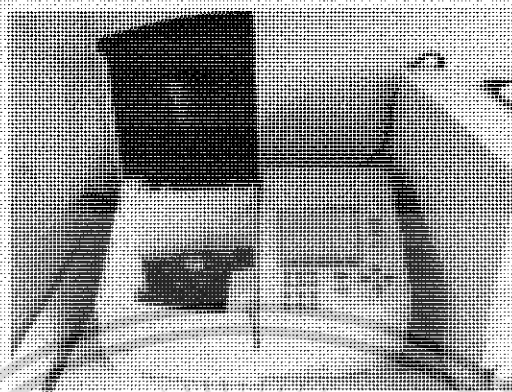
และโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กกลบนผิวของตัวอย่าง ถ้าอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกวาดของอิเล็กตรอนไปบนผิวดตัวอย่าง ซึ่งการกวาดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกวาดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เคลื่อนที่สัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบของการกวาดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกวาดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าใช้ความเร็วในการกวาดสูงจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด

2.4.2 UV-Vis Spectrophotometer

UV-Vis Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สาร โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร (nm) ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างวางที่ตำแหน่งที่วางสารตัวอย่าง แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังตัววัดแสงที่เป็น photomultiplier tube (PMT) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนการดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นโค้ง หรือสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และความยาวคลื่น รูปถ่ายเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แสดงดังรูป 2.11

76625



รูปที่ 2.11 UV-Vis สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

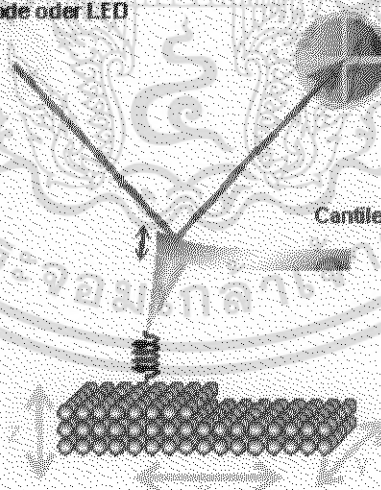
2.4.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

AFM ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวน้ำของชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆ ที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถ โค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน

Lichtquelle, z. B.
Laserdiode oder LED

Quadrantendetektor

Cantilever aus SiH



รูปที่ 2.12 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการ โค้งงอของคาน (Cantilever)

ในช่วงเริ่มแรก AFM ใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน AFM ใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 1 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของ AFM ซึ่งคานสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบลงบนคาน แล้วสะท้อนออกมาตกกระทบลงบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสง A และ B จึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้

การโค้งงอของคานนั้นเป็นไปตามกฎของฮุกโดยระยะของการโค้งขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างปลายเข็มกับตัวชิ้นงานจึงสามารถวัดได้ การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเป็โซอิเล็กทริก ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ควบคุมการเคลื่อนที่นี้สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมในแนวแกน x, y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

การทำงานด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ

AFM สามารถทำงานได้ในสองโหมดหลักคือ

- 1.) การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับ
- 2.) การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ

การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นเป็โซที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดยขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของแรงที่วัดได้ และสามารถรักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (Constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่น่าเชื่อถือได้

ส่วนการทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้มีตำแหน่งในแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่มีความละเอียดสูง จะเป็นการดีกว่าถ้าให้มีสัญญาณควบคุมย้อนกลับเล็กน้อยเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากคามมีบางส่วนของพื้นผิวไม่เรียบทำให้เข็มหรือคานเกิดความเสียหายได้

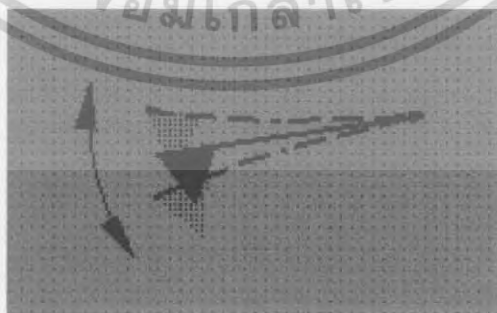
อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน

การวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงานต่าง ซึ่งอันตรกิริยาที่ใช้วัดหลักๆมีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบสั้น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)



รูปที่ 2.13 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

โหมดสัมผัส คือ เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของ AFM ซึ่งเข็มและชิ้นงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น บริเวณที่เกิดแรงผลักรวมทั้งบริเวณที่เส้นกราฟอยู่นอกรัศมี x ปัญหาที่สำคัญของโหมดสัมผัส นั้นคือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่าน ชิ้นงาน

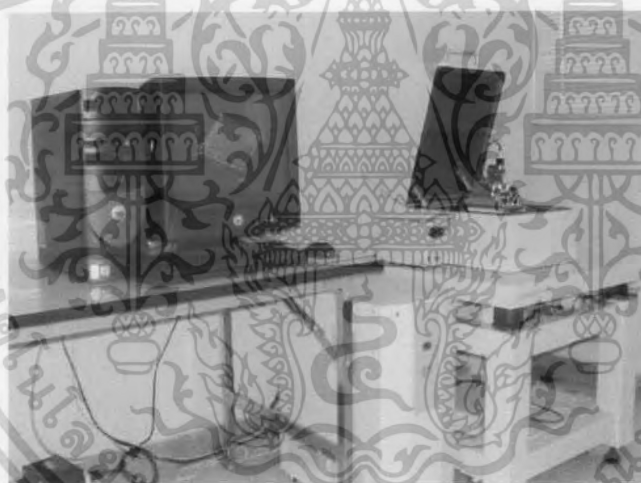


รูปที่ 2.14 ลักษณะการสั้นของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมคัมผัสแบบสั้น เป็นโหมคการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับ AFM ทั่วไป ขณะทำงาน คานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวชิ้นแบบสั้นนี้ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลักเหมือนเดิม เนื่องจากการสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่เข็มลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมาก การวัดด้วยโหมคัมผัสแบบสั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมคัมผัส

โหมคไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของ AFM ได้ คานต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมคการทำงานนี้สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนผิวหน้าของน้ำได้ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า



รูปที่ 2.15 แสดงกล้องจุลทรรศน์อเล็กตรอนแบบแรงอะตอมของบริษัท Seiko รุ่น SPA400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1 การดำเนินงานการวิจัยในขั้นตอนการศึกษา

เป็นการศึกษาค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการกัดฟิล์มบางที่ปลูกออกไซด์แบบวิธีการทางเคมี ว่ามีสารเคมีชนิดใดบ้างที่สามารถกัดออกไซด์ได้

3.2 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการทดลอง

เป็นการนำข้อมูลที่ได้รวบรวม และศึกษามาทำการทดลองการกัดฟิล์มบาง SnO_2 โดยวิธีทางเคมี ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการทำการศึกษามี 2 ชนิด คือ Oxalic acid และ Hydrogen chloride โดยทำการศึกษาสารแต่ละชนิด ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

3.2.1 การล้างฟิล์มบาง

3.2.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่อไปนี้ คือ

1. ถังมือ
2. บีกเกอร์
3. คีมคีบพลาสติก
4. น้ำ DI
5. เครื่อง Ultrasonic
6. Acetone
7. Methanal
8. Isopropanal
9. hot plate
10. ก๊าซอาร์กอน (Ar)

3.2.1.2 มีขั้นตอนดังนี้

1. นำฟิล์มที่เตรียมไว้ล้างด้วยน้ำ DI
2. แช่ใน Acetone 15 นาที
3. แช่ใน Isopropanal 15 นาที
4. แช่ในMethanal 15 นาที
5. เป่าไล่ไอน้ำด้วยก๊าซ N_2

3.2.2 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการกัดโดยวิธีทางเคมี

1. ใช้ Oxalic acid
2. ใช้ Hydrochloric acid

3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ศึกษาวิธีการกัดเพื่อหาคำตอบว่า การกัดโดยสารเคมี Oxalic acid และ Hydrochloric acid สารใดที่มีอัตราการกัดเร็วที่สุด

3.2.2.2 เตรียมอุปกรณ์

1. สาร Oxalic acid
2. สาร Hydrochloric acid
3. ฟิล์มบาง SnO_2
4. น้ำ DI
5. เครื่อง Ultrasonic
6. Acetone
7. Methanal
8. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
9. hot plate
10. thermometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 วิธีทดลอง

1. กัด SnO_2 โดยใช้สาร Oxalic acid ที่ความเข้มข้นต่างๆ

1) นำฟิล์มบางที่ทำความสะอาดแล้ว นำมาแช่ใน Oxalic acid ที่มีความเข้มข้น 4 mol ศึกษาการกัดเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

อุณหภูมิ 25 องศา

อุณหภูมิ 30 องศา

อุณหภูมิ 35 องศา

อุณหภูมิ 40 องศา

อุณหภูมิ 45 องศา

2) นำฟิล์มบางที่ทำความสะอาดแล้ว มาแช่ใน Oxalic acid ที่มีความเข้มข้น 4 mol ที่อุณหภูมิ 40 °c ศึกษาการกัดที่เวลาต่างๆ ดังนี้

เวลา 30 นาที

เวลา 60 นาที

เวลา 90 นาที

เวลา 120 นาที

เวลา 150 นาที

2. การทดลองโดยใช้สาร Hydrochloric acid

1) นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้วมาแช่ใน Hydrochloric acid เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ ต่างๆ ดังนี้

อุณหภูมิ 25 องศา

อุณหภูมิ 30 องศา

อุณหภูมิ 35 องศา

อุณหภูมิ 40 องศา

อุณหภูมิ 45 องศา

2) นำฟิล์มที่ทำความสะอาดแล้วมาแช่ใน Hydrochloric acid

ที่อุณหภูมิ 40 °c ศึกษาการกัดที่เวลาต่างๆ ดังนี้

เวลา 30 นาที

เวลา 60 นาที

เวลา 90 นาที

เวลา 120 นาที

เวลา 150 นาที

3.3 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้

ในเป็นการนำบาง SnO_2 ที่ปลูกโดยวิธีสปีดเดอริง แล้วทำการกัดด้วยวิธีการกัด โดยใช้วิธีทางเคมี (wet etching) มาวัดค่าหาความหนาด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer และดูสภาพพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM

3.3.1 การวัดเพื่อหาค่าความหนาของฟิล์ม ด้วยวิธีการดูดกลืนด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer

ในการวัดความหนาของฟิล์มด้วยวิธีนี้ จะพิจารณาการลดลงของความเข้มแสงที่ทะลุผ่านชิ้นงานที่ต้องการหาความหนาโดยกำหนดให้

I_0 คือ ค่าความเข้มแสงเริ่มต้นขณะที่ยังไม่ผ่านชิ้นงาน

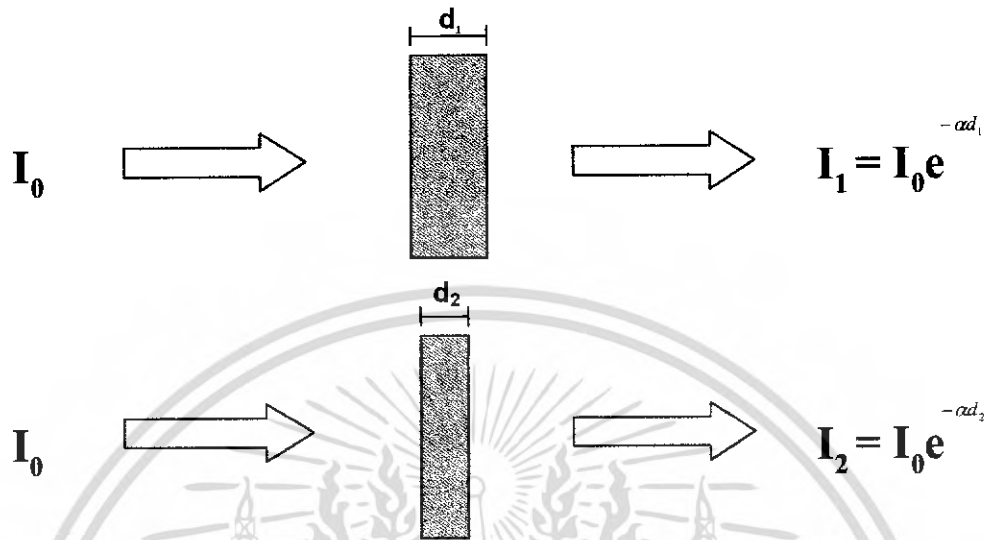
I_1 คือ ค่าความเข้มแสงภายหลังการทะลุผ่านชิ้นงานของฟิล์มบางก่อนการทำการกัด

I_2 คือ ค่าความเข้มแสงภายหลังการทะลุผ่านชิ้นงานของฟิล์มบางหลังจากการทำการกัด

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

d_1 คือ ค่าความหนาของฟิล์มก่อนทำการกัด

d_2 คือ ค่าความหนาของฟิล์มหลังทำการกัด



รูปที่ 3.1 แสดงสมการ Beer-Lambard

จากสมการพื้นฐานจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เหล่านี้คือ

จากสูตร

$$I_0 = I_1 e^{-ad}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-ad}$$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -ad$$

$$\ln(I_1) - \ln(I_0) = -ad_1 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\ln(I_2) - \ln(I_0) = -ad_2 \dots\dots\dots(3.2)$$

$$(2)/(1); \frac{\ln(I_2) - \ln(I_0)}{\ln(I_1) - \ln(I_0)} = \frac{-ad_2}{-ad_1}$$

$$\frac{\ln(I_2) - \ln(I_0)}{\ln(I_1) - \ln(I_0)} = \frac{d_2}{d_1}$$

$$d_2 = d_1 \times \left[\frac{\ln(I_2) - \ln(I_0)}{\ln(I_1) - \ln(I_0)} \right] \dots\dots\dots(3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองจากการกัดฟิล์มบาง SnO_2

ฟิล์มบาง SnO_2 ที่นำมาศึกษาใน โครงงานพิเศษนี้เป็นฟิล์มบาง SnO_2 ที่ปลูก โดยวิธีสปัตเตอร์ริง แล้ว มาศึกษาวิธีการกัด โดยใช้วิธีทางเคมี (wet etching) สารเคมีที่เลือกใช้ในการศึกษาคือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดออกซาลิก (Oxalic acid) และมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางทินออกไซด์ (SnO_2)

จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปฟิล์มบาง SnO_2 ที่นำมาใช้ใน โครงงานพิเศษนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บางกอกโซล่าเซลล์ จำกัด ได้ทำการตัดให้มีขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ขณะวัดความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์ อ่านค่าความต้านทานได้ 0.04 โอห์ม

4.1.1 เงื่อนไขการกัดฟิล์มบาง SnO₂

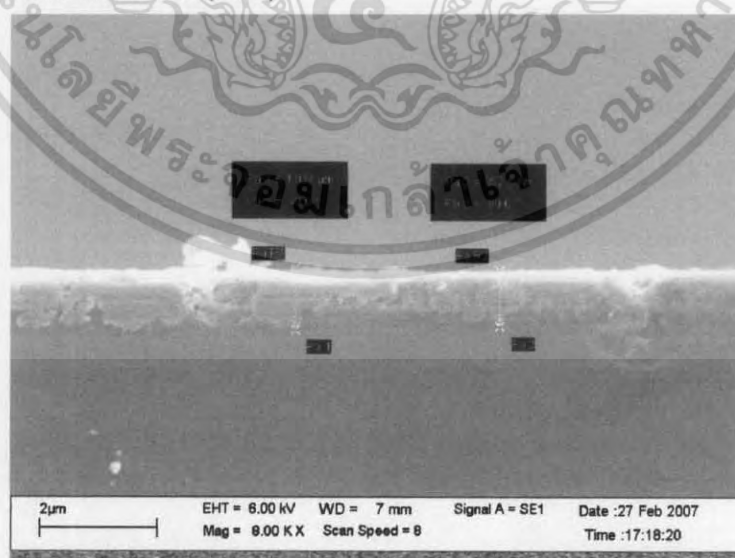
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกัดฟิล์มบาง SnO₂

ตัวอย่าง	ควบคุมเวลาที่ 60 นาที		ควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C	
	กัดด้วย HCl	กัดด้วย Oxalic	กัดด้วย HCl	กัดด้วย Oxalic
1	non-etch	non-etch	non-etch	non-etch
2	25°C	25°C	30 min	30 min
3	30°C	30°C	60 min	60 min
4	35°C	35°C	90 min	90 min
5	40°C	40°C	120 min	120 min
6	45°C	45°C	150 min	150 min

แสดงชุดการทดลองที่ใช้ในการกัดฟิล์มบาง SnO₂ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดเพื่อที่จะเปรียบเทียบความแตกต่างของฟิล์มบาง SnO₂

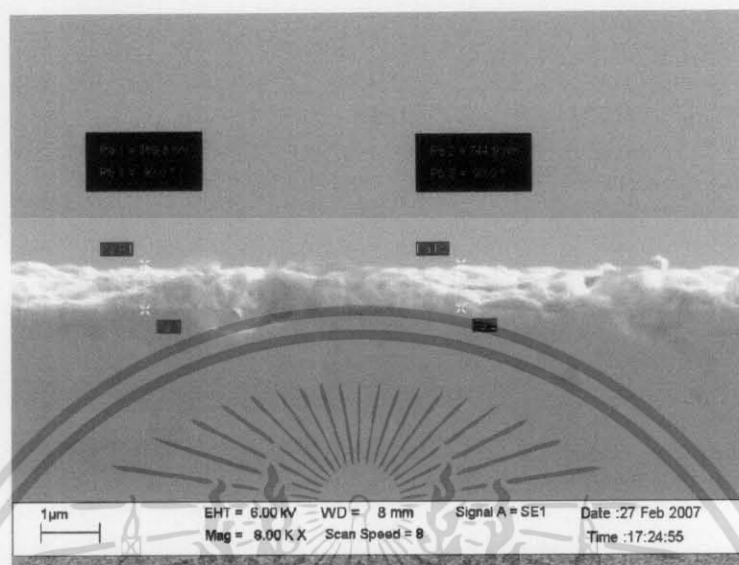
4.1.2 การคำนวณหาความหนาของฟิล์มหลังจากการกัด

ในการทดลองเราทำการอ้างอิงด้วยกรวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM)



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.2 (a) และ (b) แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM)

จากการวัดสามารถหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ จากสมการของ Beer-Lambard ในบทที่ 3 ค่า d_1 เป็นค่าที่เป็นความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนการกัด ที่วัดความหนาจากเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

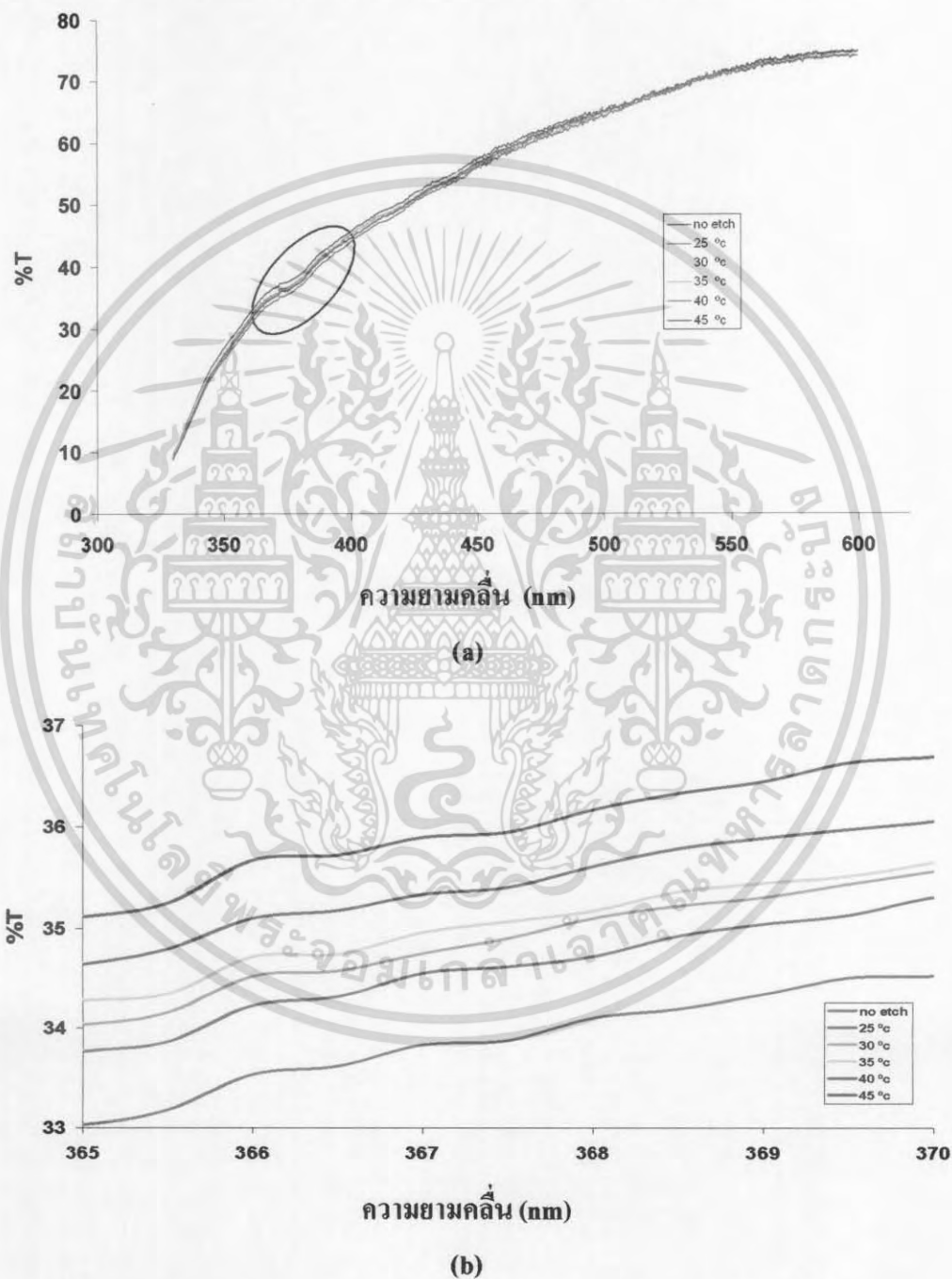
$$\text{โดยให้เป็นค่า } d_1 = [(1038+952.5+769.3+744.9) \times 10^3] / 4$$

$$d_1 = 876.175 \text{ nm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของการวัดด้วย UV-Vis spectrometer

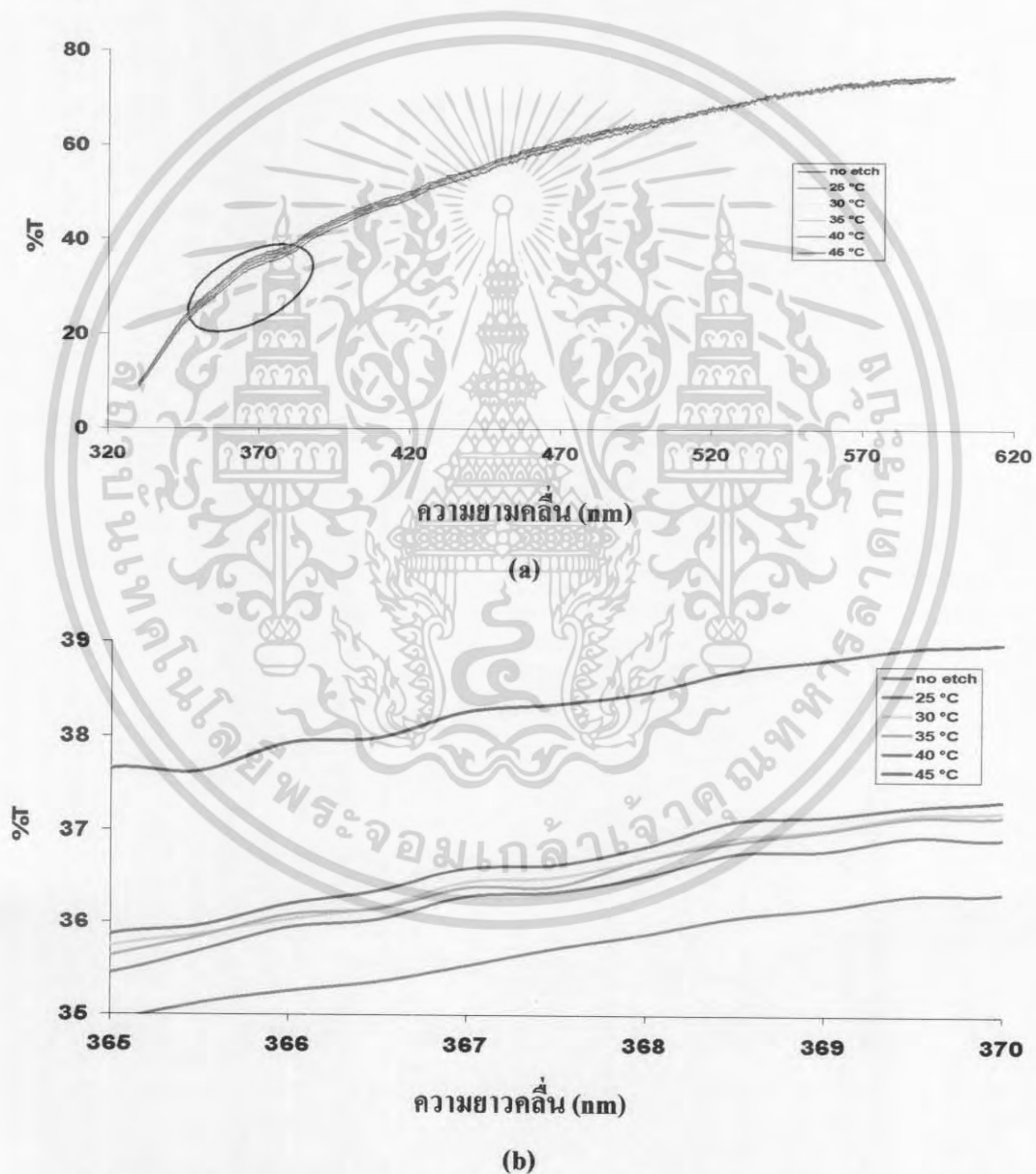
เมื่อนำฟิล์มบาง SnO₂ วัดด้วย UV-vis spectrometer ผลที่ได้เป็นดังรูป



รูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO₂ ชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

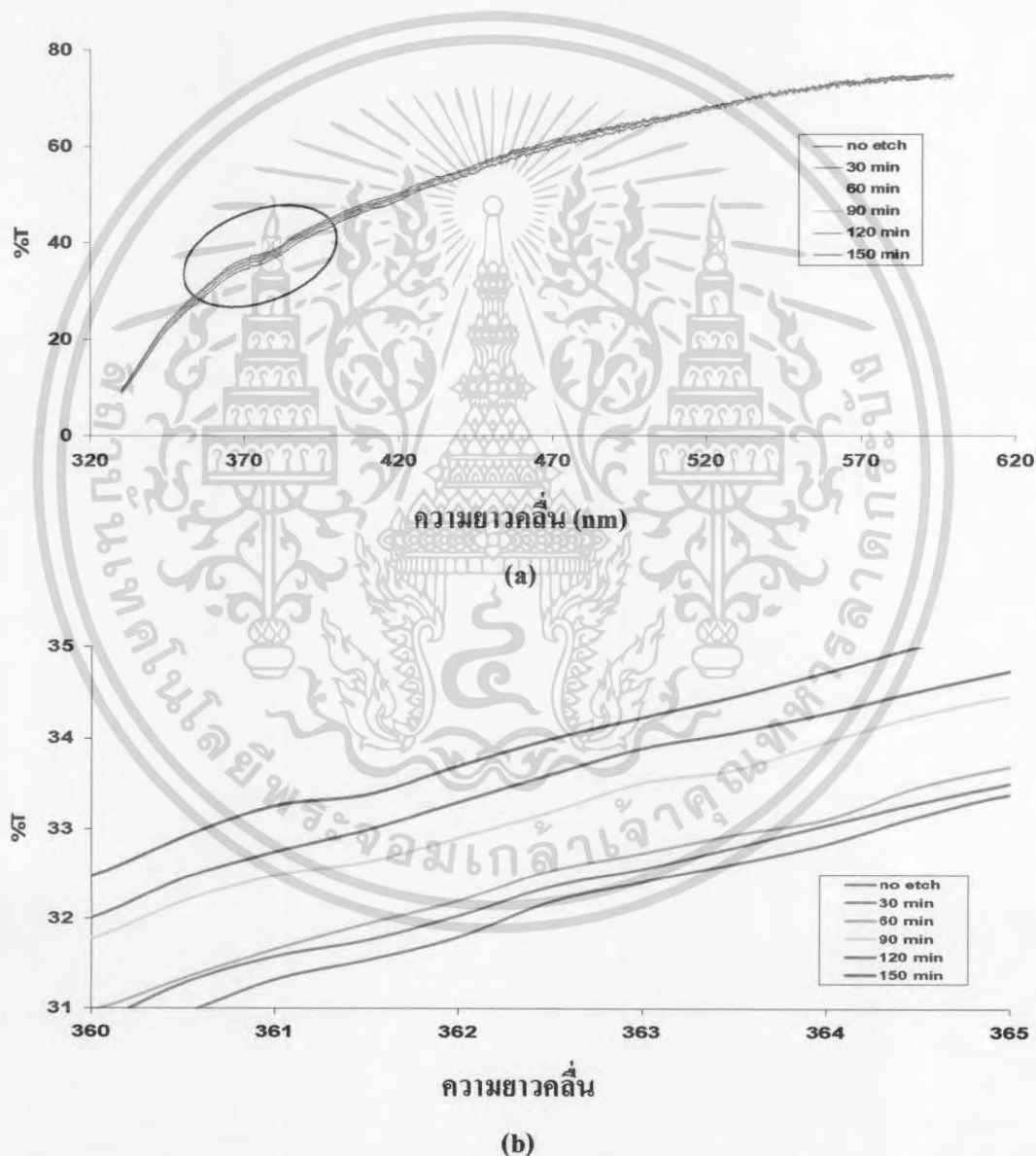
จากรูปที่ 4.3 (a) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 1 ที่ทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) ที่อุณหภูมิ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C โดยควบคุมเวลา 60 นาทีเปรียบเทียบกับฟิล์ม SnO_2 ที่ไม่ได้กัด การกัดที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้น (b) เป็นรูปขยายของช่วงความยาวคลื่นที่นำมาหาความหนาคือ 375 nm.



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

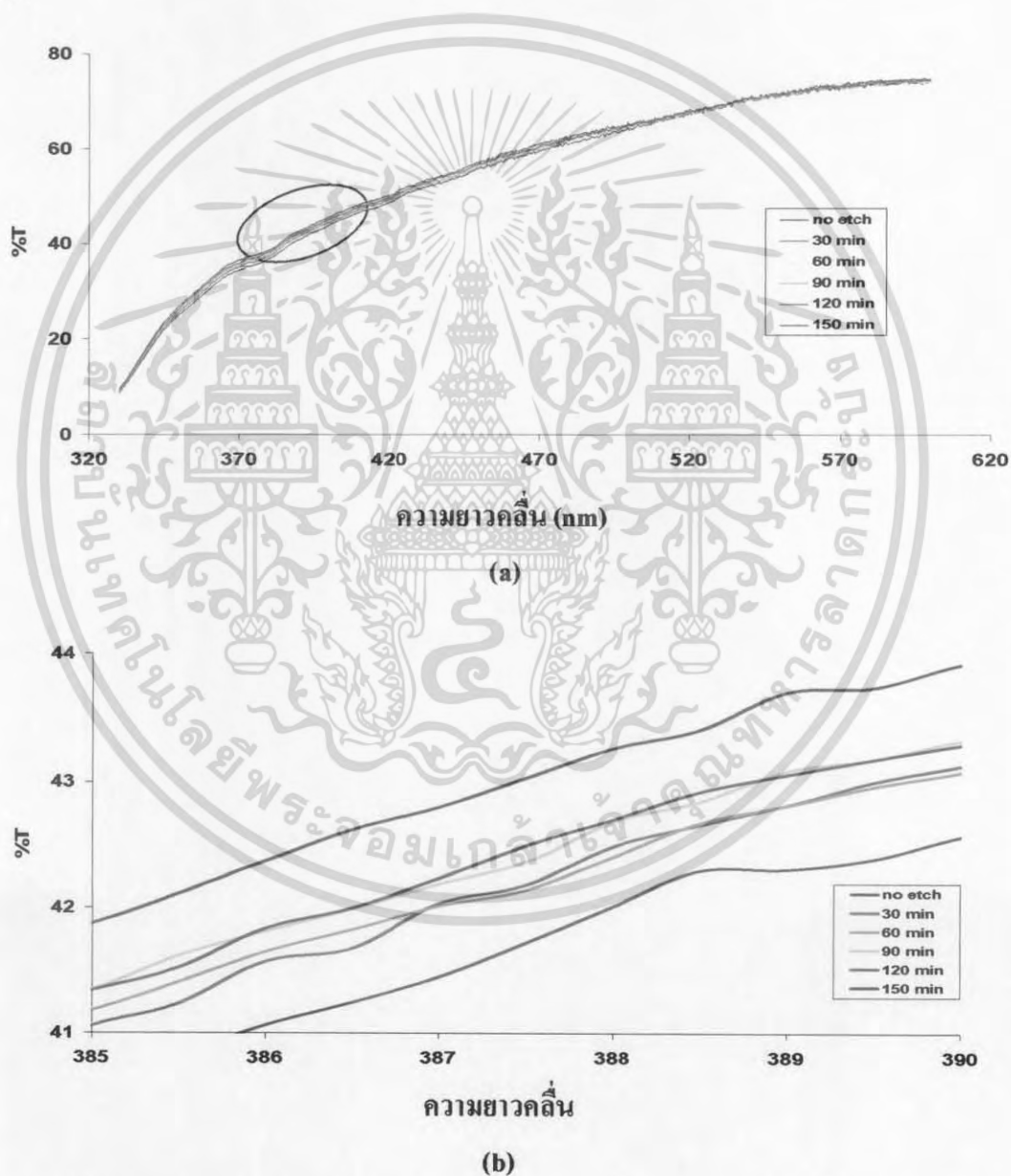
จากรูปที่ 4.4 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 2 ที่ทำการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) ที่อุณหภูมิ 25°C , 30°C , 35°C , 40°C และ 45°C โดยควบคุมเวลา 60 นาที เปรียบเทียบกับฟิล์ม SnO_2 ที่ไม่ได้กัด การกัดที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้น (b) เป็นรูปขยายของช่วงความยาวคลื่นที่นำมาหาความหนาคือ 377 nm .



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 2 ที่ทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที โดยการควบคุมอุณหภูมิ 40°C เปรียบเทียบกับฟิล์ม SnO_2 ที่ไม่ได้กัด การกัดที่เวลาเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้น (b) เป็นรูปขยายของช่วงความยาวคลื่นที่นำมาหาความหนาคือ 374 nm.



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 (a) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง SnO_2 ชุดที่ 4 ที่ทำการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) ที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาทีโดยการควบคุมอุณหภูมิ 40°C เปรียบเทียบกับฟิล์ม SnO_2 ที่ไม่ได้กัด การกัดที่เวลาเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้น (b) เป็นรูปขยายของช่วงความยาวคลื่นที่นำมาหาความหนาคือ 376 nm.

4.3 ผลจากการคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง SnO_2

เมื่อทำการคำนวณด้วยสมการของ Beer-Lambard แบ่งออกเป็น ดังนี้

ชุดที่ 1 กัดโดย HCl ที่เวลา 60 นาที ที่ความยาวคลื่น 370-380 nm.

ชุดที่ 2 กัดโดย Oxalic acid ที่เวลา 60 นาที ที่ความยาวคลื่น 370-380 nm.

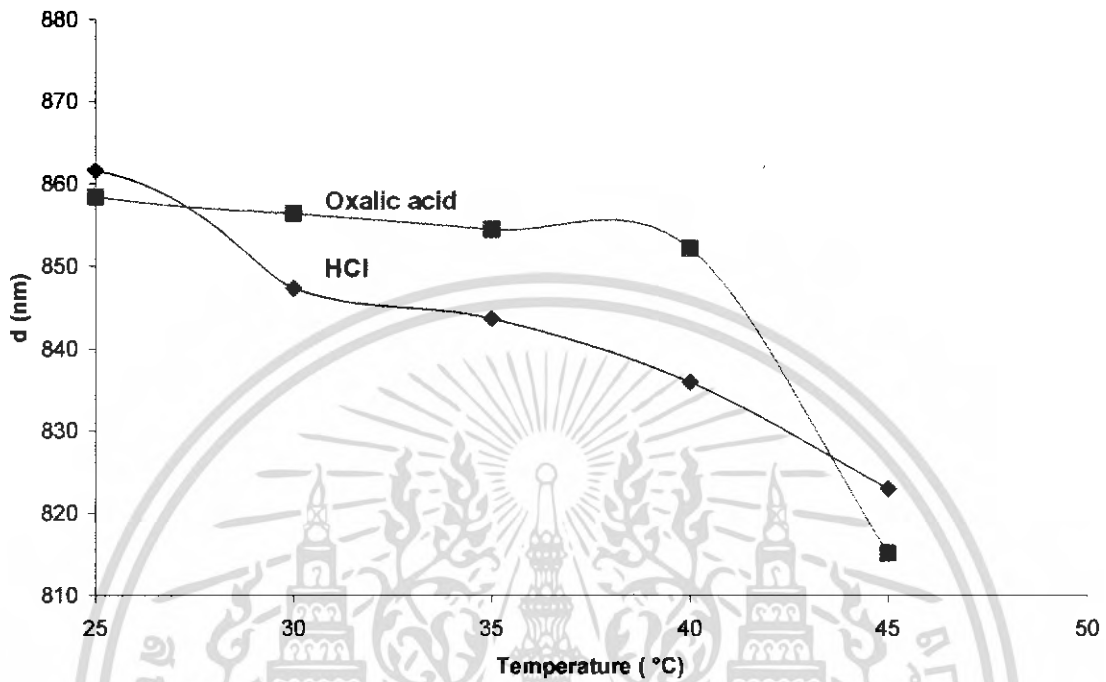
ชุดที่ 3 กัดโดย HCl ที่อุณหภูมิ 40°C ที่ความยาวคลื่น 370-380 nm.

ชุดที่ 4 กัดโดย Oxalic acid ที่อุณหภูมิ 40°C ที่ความยาวคลื่น 370-380 nm.

ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

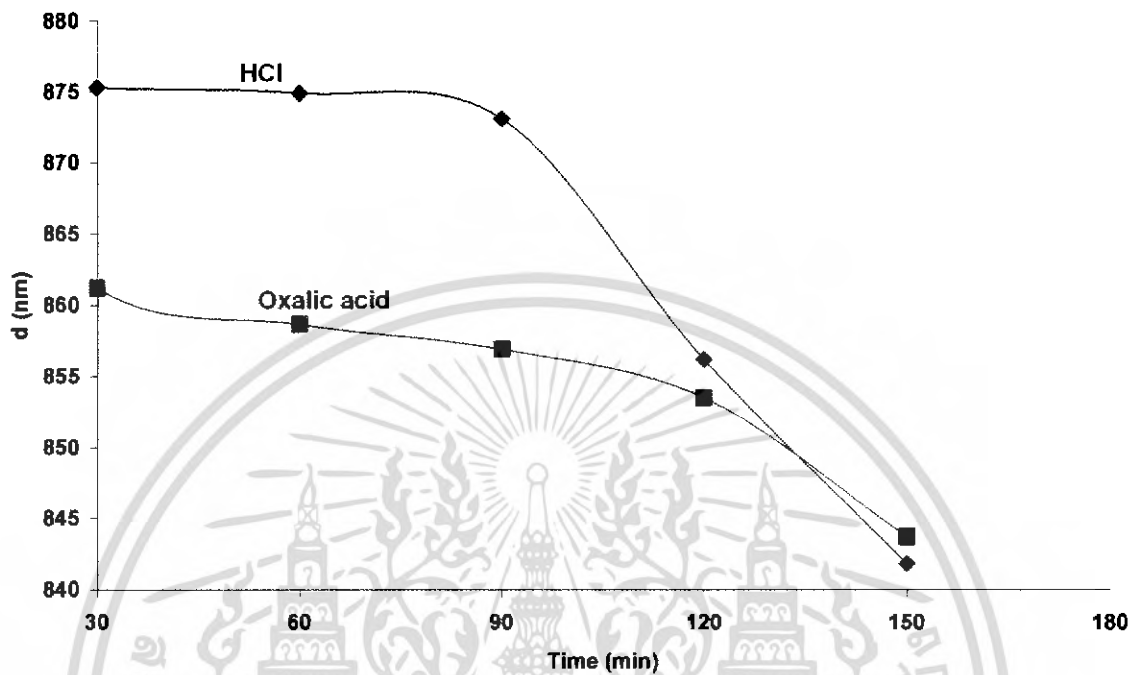
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2

ตัวอย่าง	ความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 (nm.)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
1	876.17	876.18	876.18	876.18
2	861.67	858.50	875.34	861.27
3	847.40	856.45	874.91	858.70
4	843.70	854.51	873.06	856.92
5	835.94	852.14	856.16	853.48
6	822.93	815.18	841.83	843.73



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2

จากรูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 เป็นผลจากการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่าช่วงอุณหภูมิ 30°C-40°C HCl จะกัดได้ดีกว่า Oxalic acid และช่วงอุณหภูมิ 40°C-45°C Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และชุดที่ 4

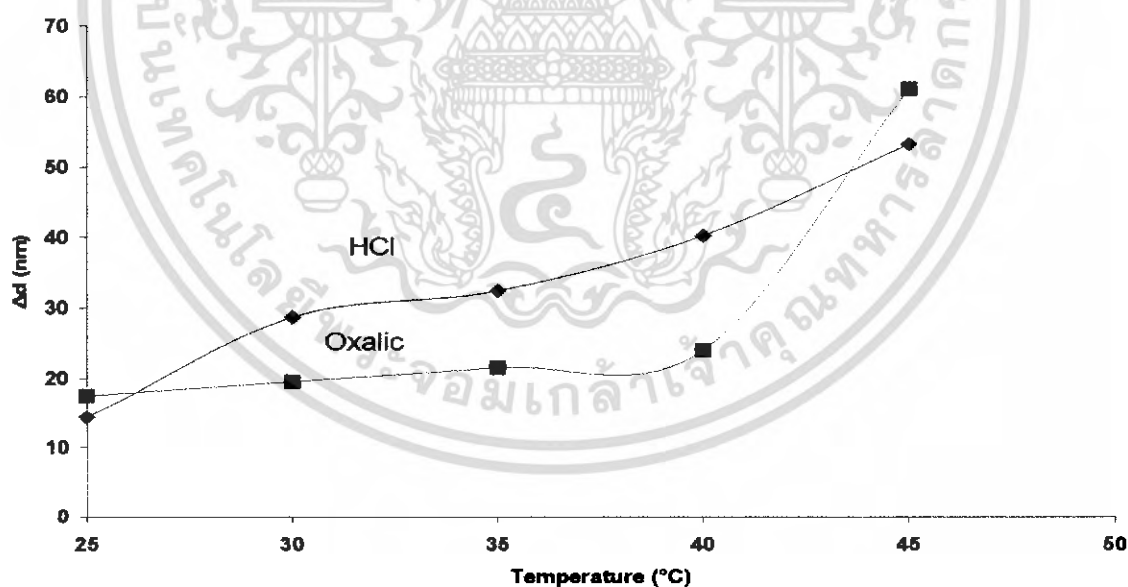
จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และชุดที่ 4 เป็นผลจากการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และเปลี่ยนเวลา 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที จะเห็นว่าช่วงเวลา 30-120 นาที Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl และช่วงเวลา 120-150 นาที HCl จะกัดได้ดีกว่า Oxalic acid

4.4 ผลจากการคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้

การคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้จะคำนวณจาก $\Delta d = d_1 - d_2$ แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้

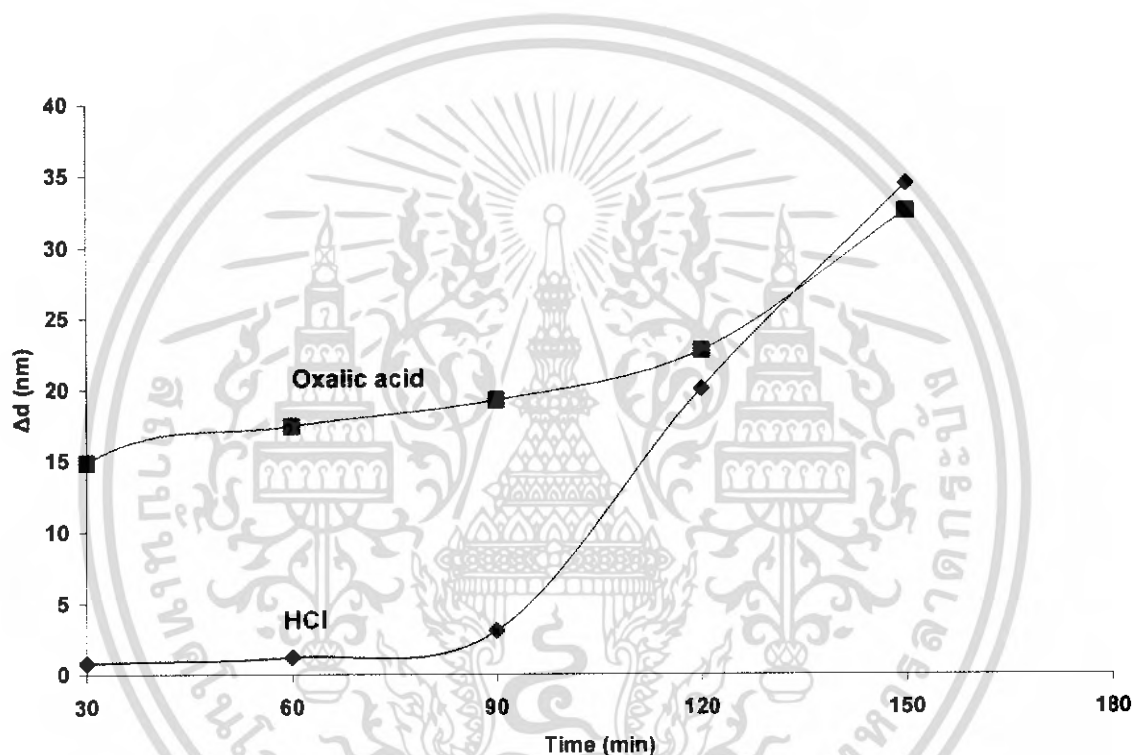
ตัวอย่าง	ความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้ (nm)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
2	14.51	17.67	0.83	14.91
3	28.77	19.73	1.26	17.48
4	32.47	21.66	3.12	19.25
5	40.23	24.03	20.01	22.69
6	53.25	60.99	34.35	32.45



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของจุดที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กักได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ 2 เป็นผลจากการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible เปรียบเทียบระหว่างการกักด้วย HCl และ Oxalic acid ความเข้มข้น 0.35 โมล ควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่าช่วงอุณหภูมิ 30°C-40°C HCl จะกักได้ดีกว่า Oxalic acid และช่วงอุณหภูมิ 40°C-45°C Oxalic acid จะกักได้ดีกว่า HCl



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กักได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4

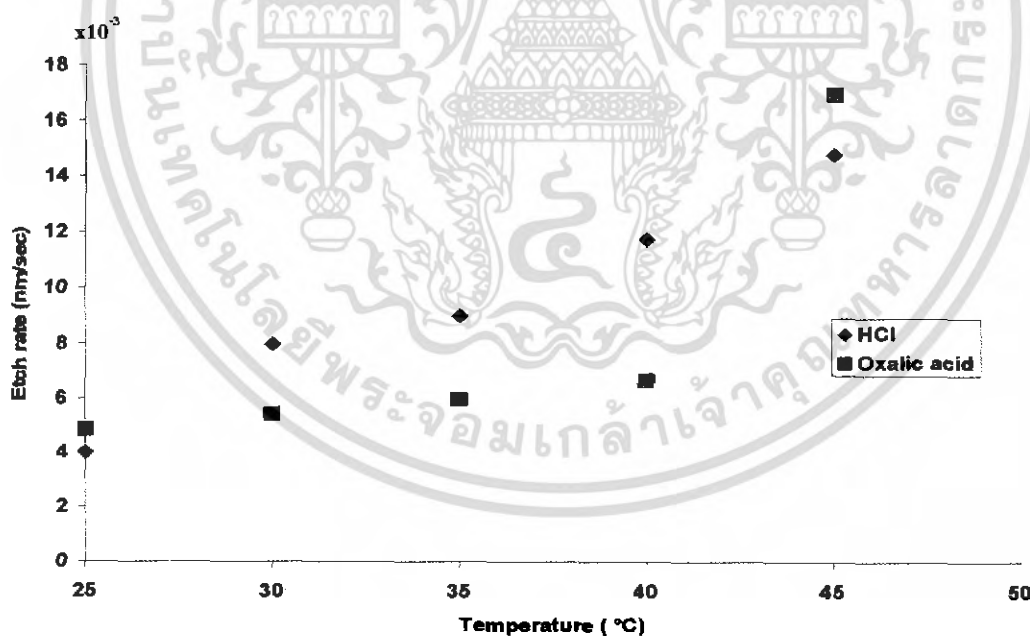
จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กักได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4 เป็นผลจากการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible เปรียบเทียบระหว่างการกักด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และเปลี่ยนเวลาเป็น 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที จะเห็นว่าช่วงเวลา 30-120 นาที Oxalic acid จะกักได้ดีกว่า HCl และช่วงเวลา 120-150 นาที HCl จะกักได้ดีกว่า Oxalic acid

4.5 ผลจากการคำนวณหาค่าอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂

เมื่อหาความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่ทำการกัดแล้วเราก็สามารถคำนวณหาอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂ คำนวณจาก $\Delta d/t$ ได้ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂

ตัวอย่าง	อัตราการกัด (nm/sec)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
2	4.02×10^{-3}	4.90×10^{-3}	0.46×10^{-3}	8.28×10^{-3}
3	7.99×10^{-3}	5.48×10^{-3}	0.35×10^{-3}	4.85×10^{-3}
4	9.02×10^{-3}	6.01×10^{-3}	0.57×10^{-3}	3.56×10^{-3}
5	11.76×10^{-3}	6.67×10^{-3}	2.78×10^{-3}	3.15×10^{-3}
6	14.79×10^{-3}	16.94×10^{-3}	3.81×10^{-3}	3.60×10^{-3}



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่าช่วงอุณหภูมิ 30°C-40°C HCl จะกัดได้ดีกว่า Oxalic acid และช่วงอุณหภูมิ 40°C-45°C Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl

4.6 การวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM)

เป็นการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนและหลังการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) และกรดออกซาลิก(Oxalic acid) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM)



(ก.)

(ข.)

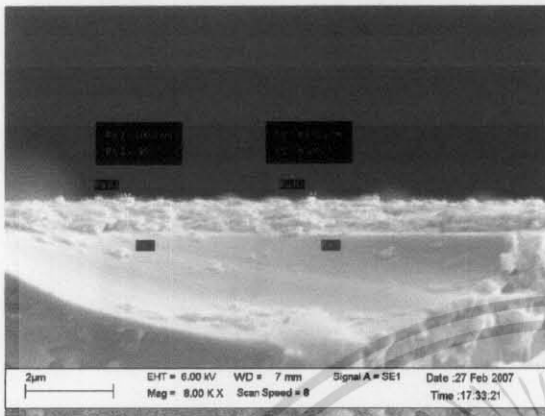
รูปที่ 4.12 (ก.) และ (ข.) แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM)

จากการวัดสามารถหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ จากสมการของ Beer-Lambard ในบทที่ 3 ค่า d_1 เป็นค่าที่เป็นความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบาง SnO₂ ก่อนการกัด ที่วัดความหนาจากเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

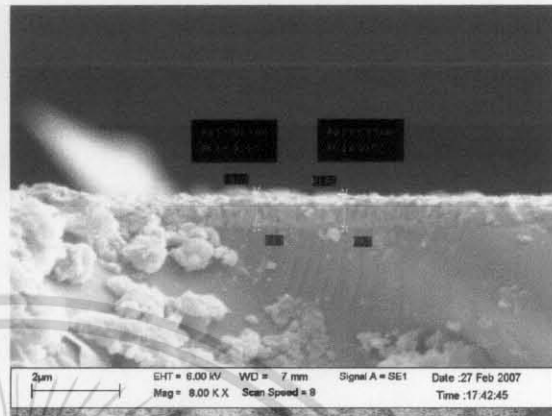
$$\text{โดยให้เป็นค่า } d_1 = [(1038+952.5+769.3+744.9) \times 10^{-9}] / 4$$

$$d_1 = 876.175 \text{ nm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



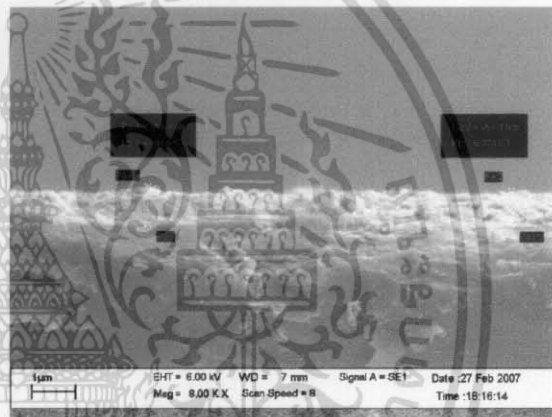
(a)



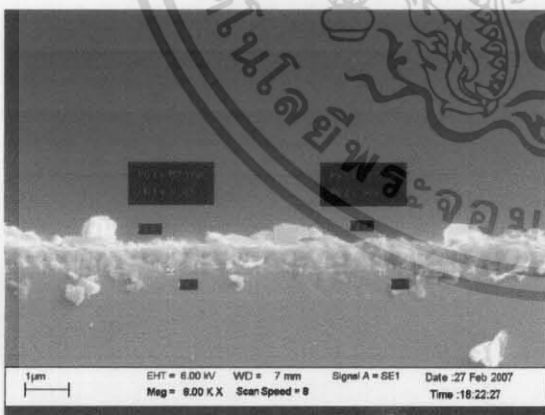
(b)



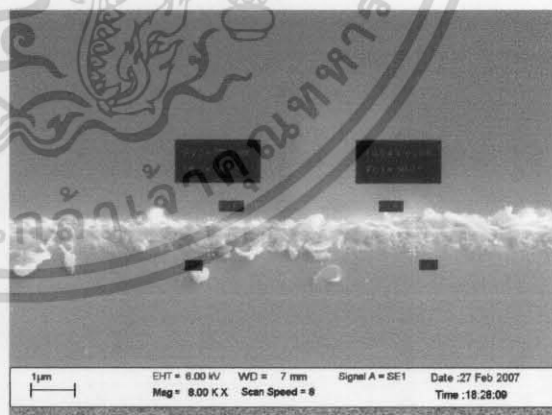
(c)



(d)

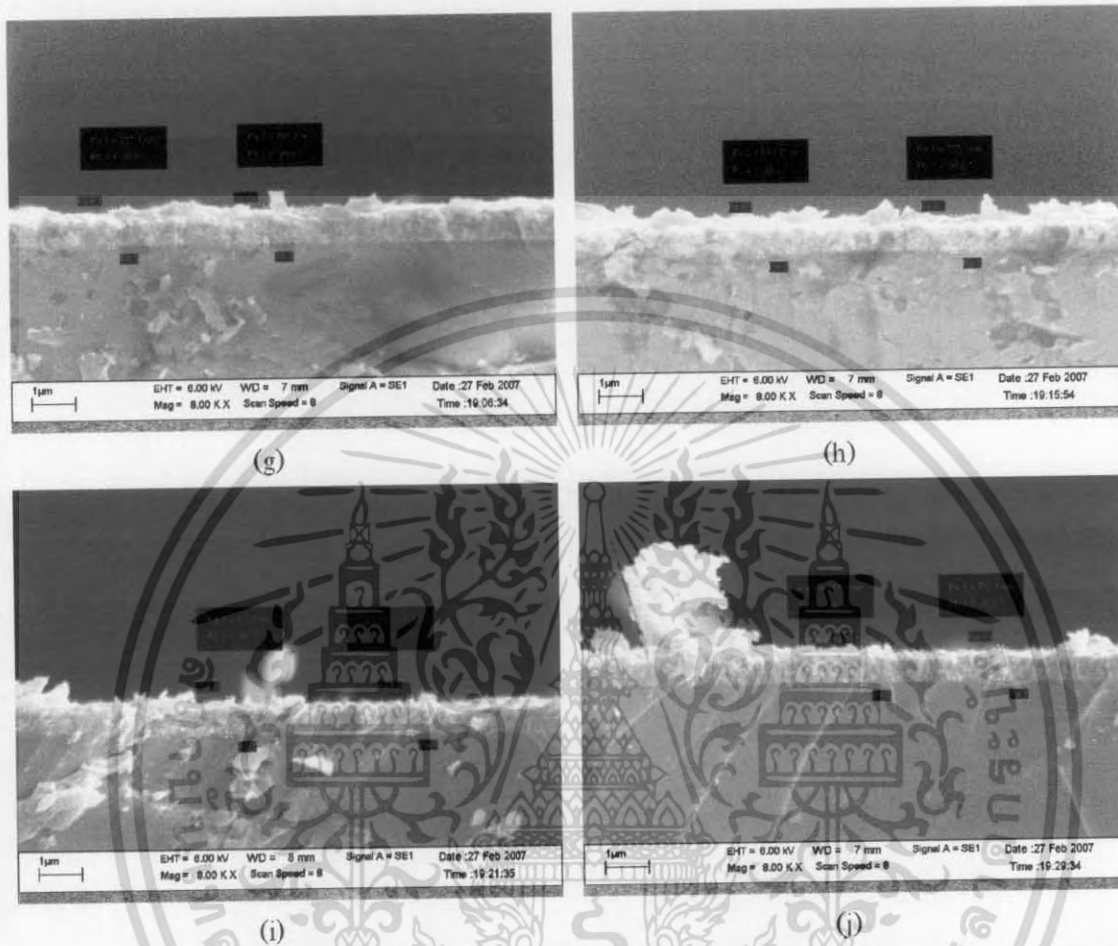


(e)



(f)

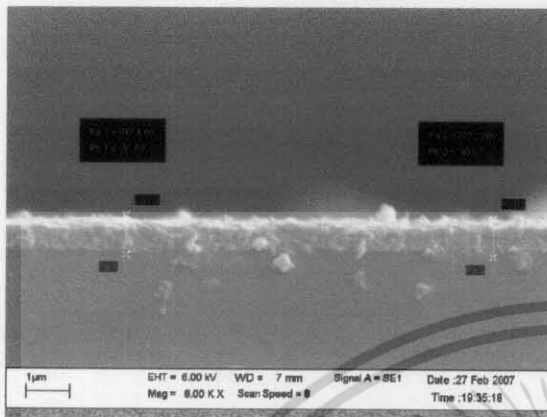
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



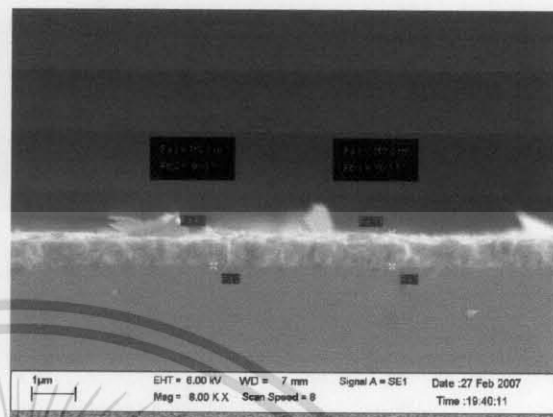
รูปที่ 4.13 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เวลา 60 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกึ่งอนุภาค(SEM) โดย(a) และ (b) การกัดที่อุณหภูมิ 25°C, (c) และ (d) การกัดที่อุณหภูมิ 30°C, (e) และ (f) การกัดที่อุณหภูมิ 35°C, (g) และ (h) การกัดที่อุณหภูมิ 40°C, (i) และ (j) การกัดที่อุณหภูมิ 45°C

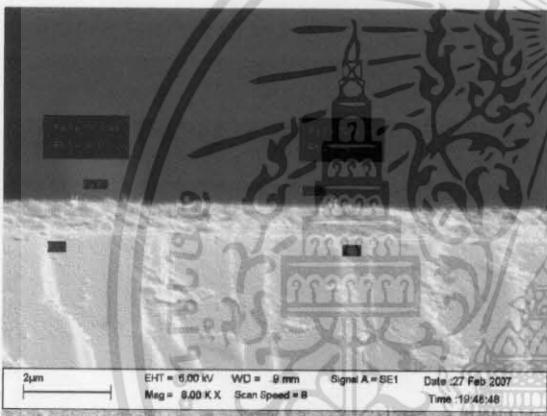
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



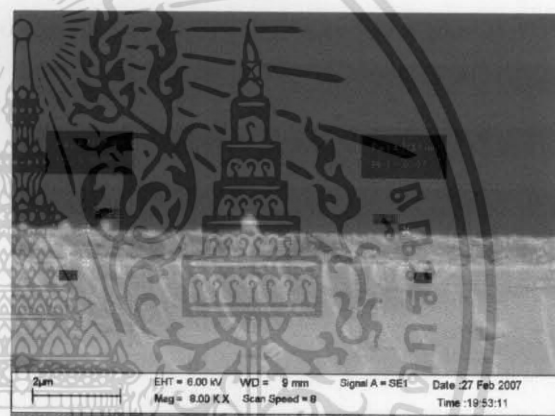
(a)



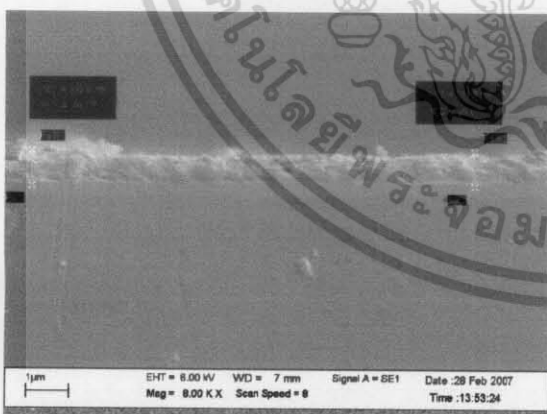
(b)



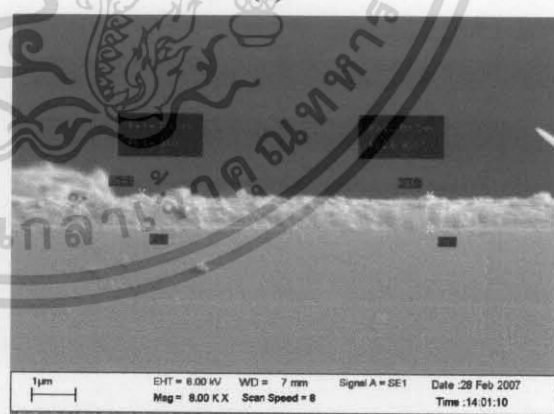
(c)



(d)

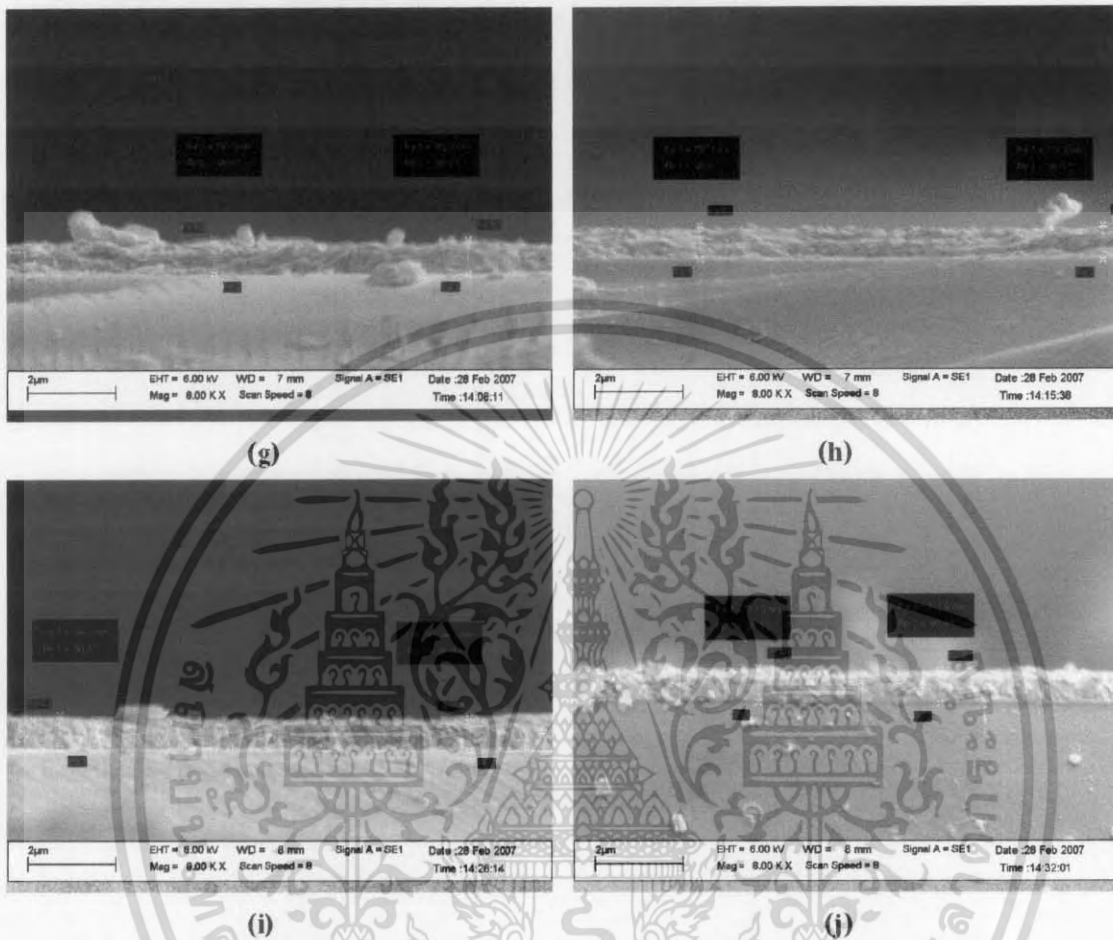


(e)



(f)

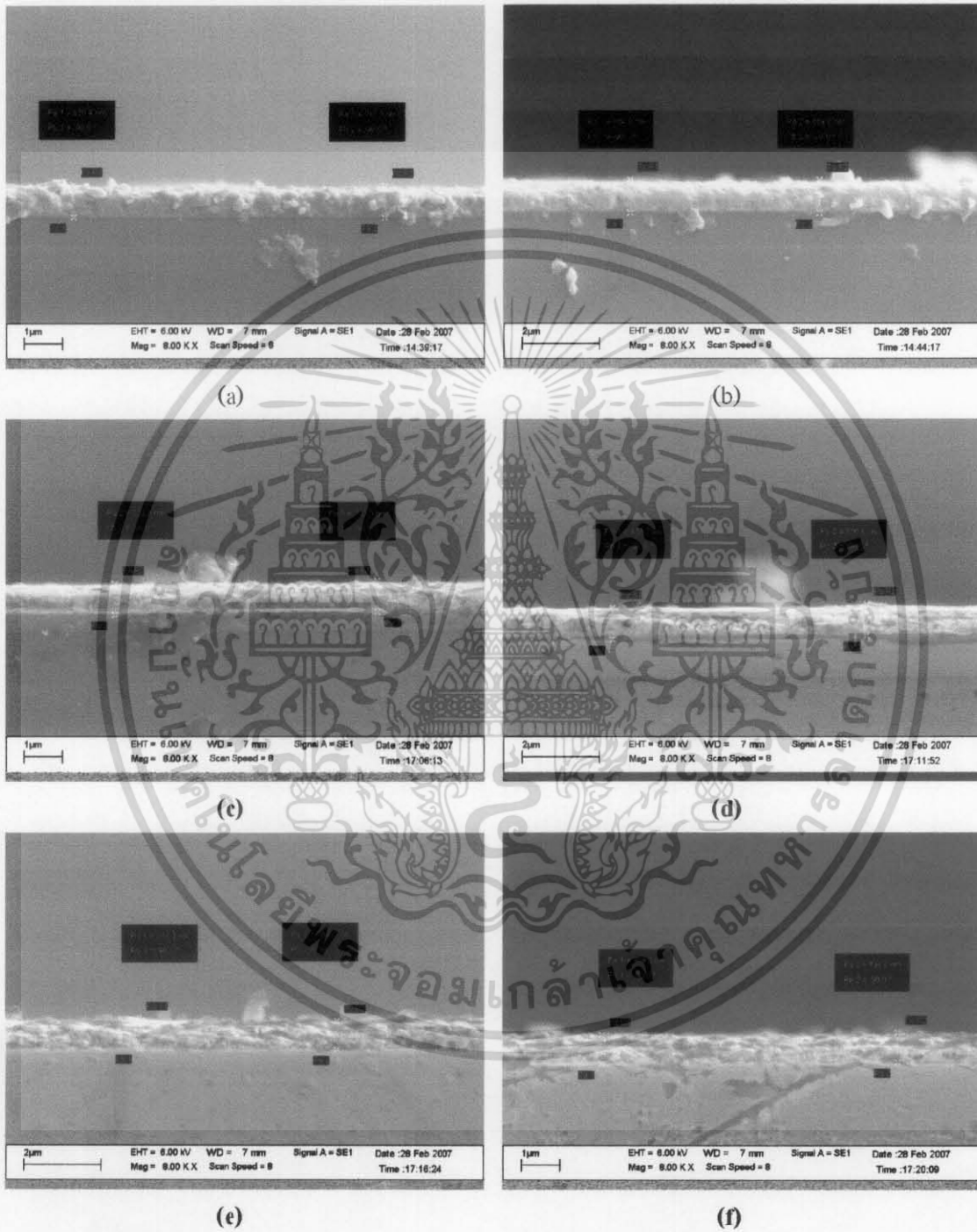
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



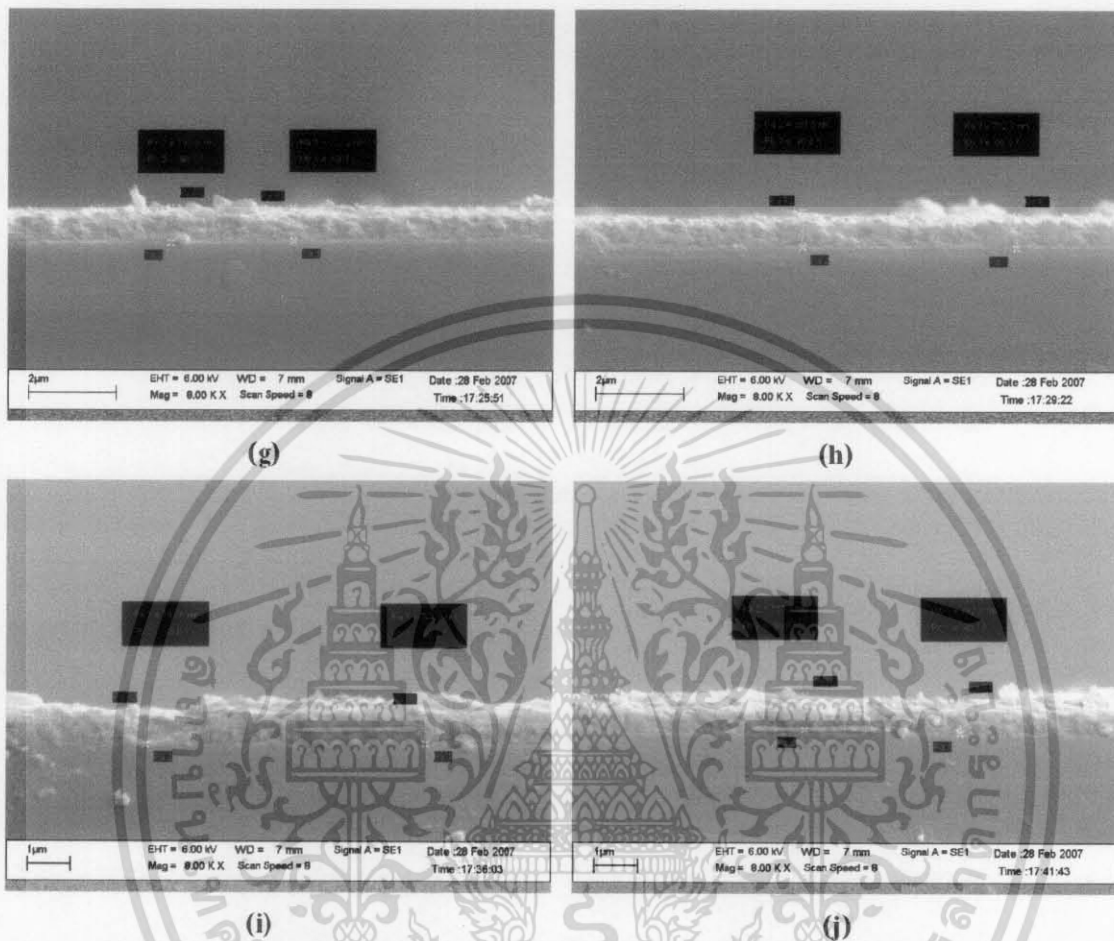
รูปที่ 4.14 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดออกซาลิก (Oxalic acid) ที่เวลา 60 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) โดย(a) และ (b) การกัดที่อุณหภูมิ 25°C, (c) และ (d) การกัดที่อุณหภูมิ 30°C, (e) และ (f) การกัดที่อุณหภูมิ 35°C, (g) และ (h) การกัดที่อุณหภูมิ 40°C, (i) และ (j) การกัดที่อุณหภูมิ 45°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



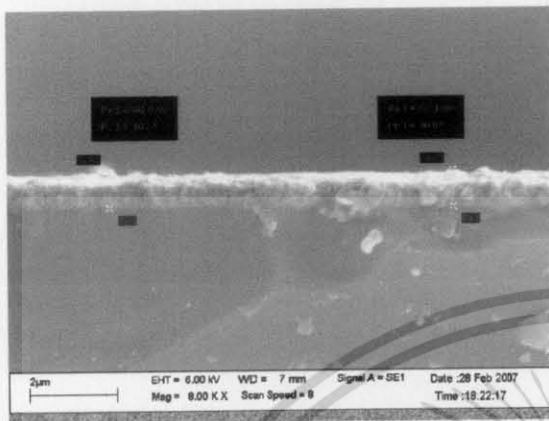
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



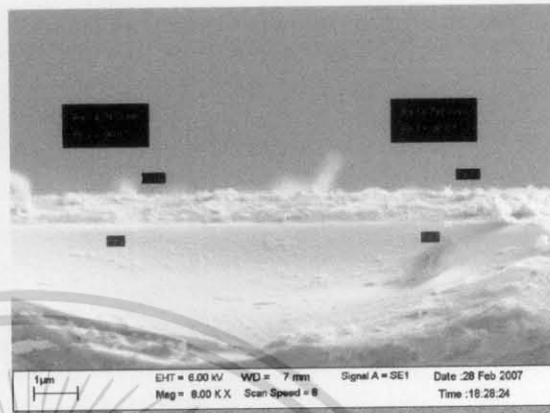
รูปที่ 4.15 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ หลังการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ หลังการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) โดย(a) และ (b) การกัดที่เวลา 30 นาที, (c) และ (d) การกัดที่เวลา 60 นาที, (e) และ (f) การกัดที่เวลา 90 นาที, (g) และ (h) การกัดที่เวลา 120 นาที, (i) และ (j) การกัดที่เวลา 150 นาที

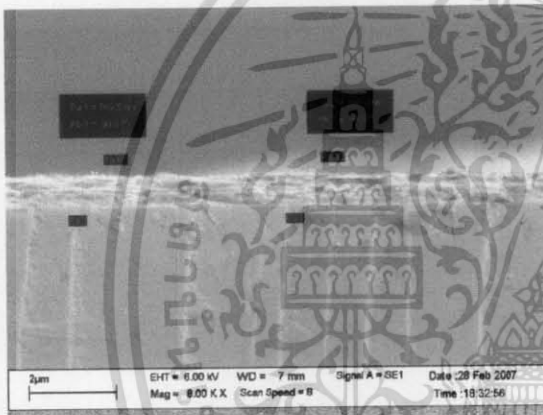
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



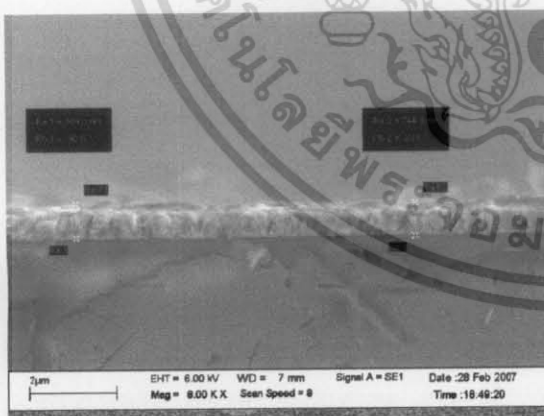
(b)



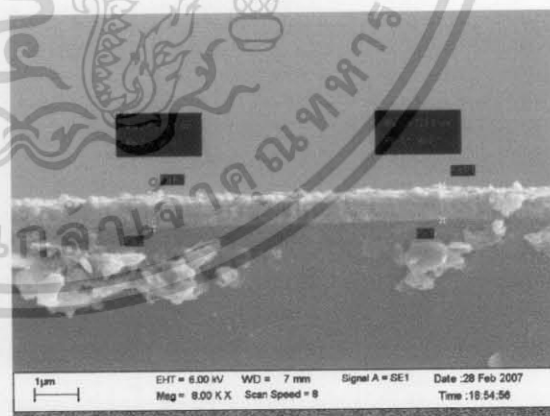
(c)



(d)

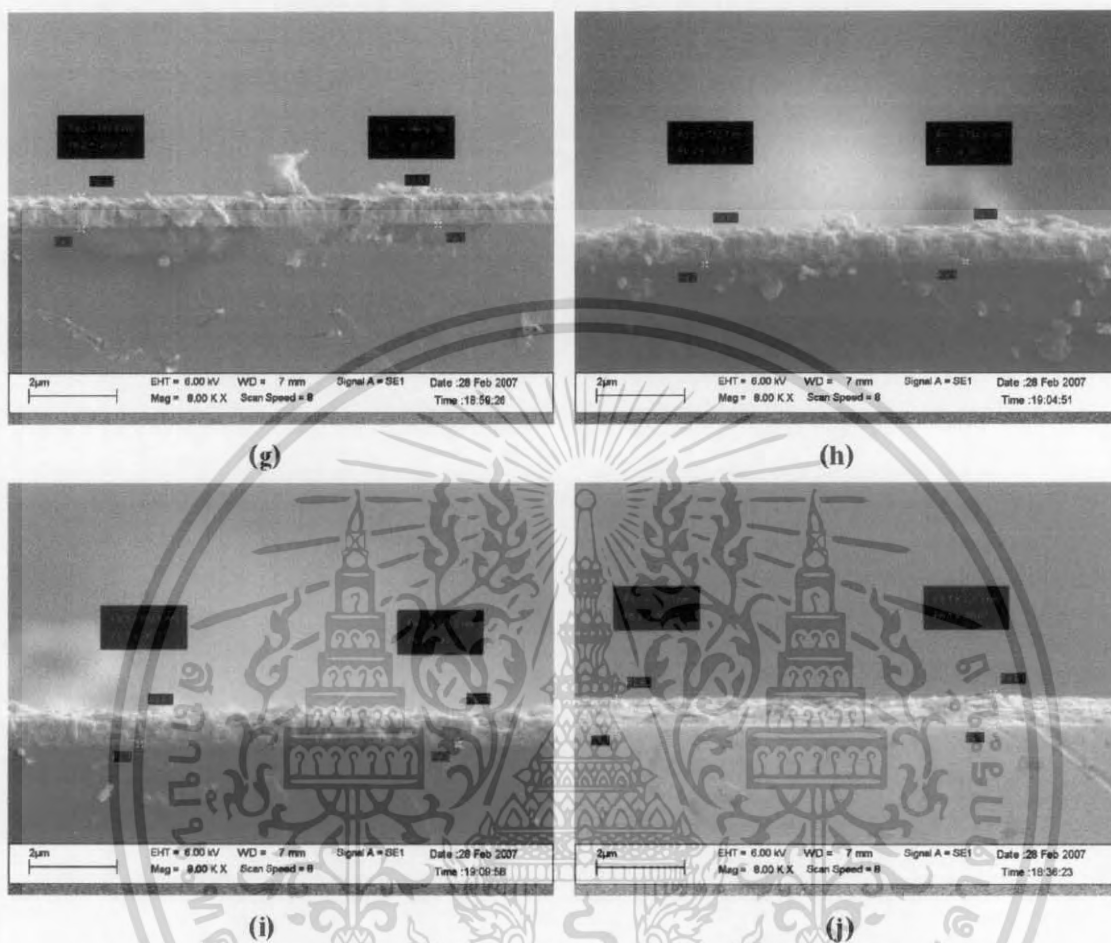


(e)



(f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)

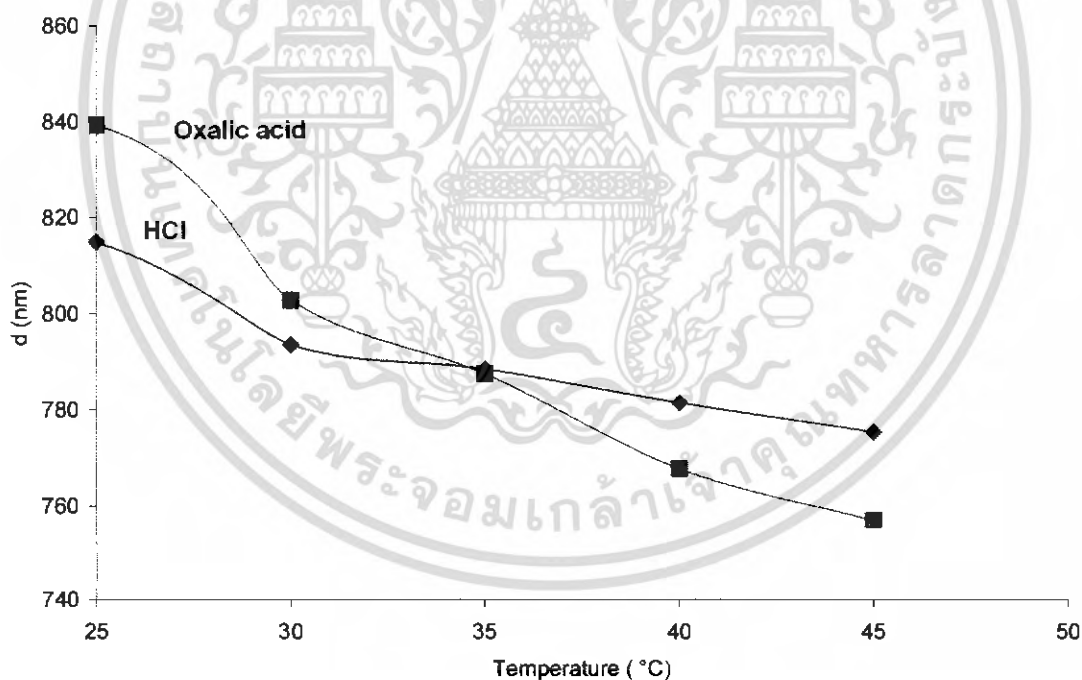
จากรูปที่ 4.16 แสดงผลจากการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 หลังการกัดด้วยกรดออกซาลิก (Oxalic acid) ที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) โดย(a) และ (b) การกัดที่เวลา 30 นาที, (c) และ (d) การกัดที่เวลา 60 นาที, (e) และ (f) การกัดที่เวลา 90 นาที, (g) และ (h) การกัดที่เวลา 120 นาที, (i) และ (j) การกัดที่เวลา 150 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง SnO₂

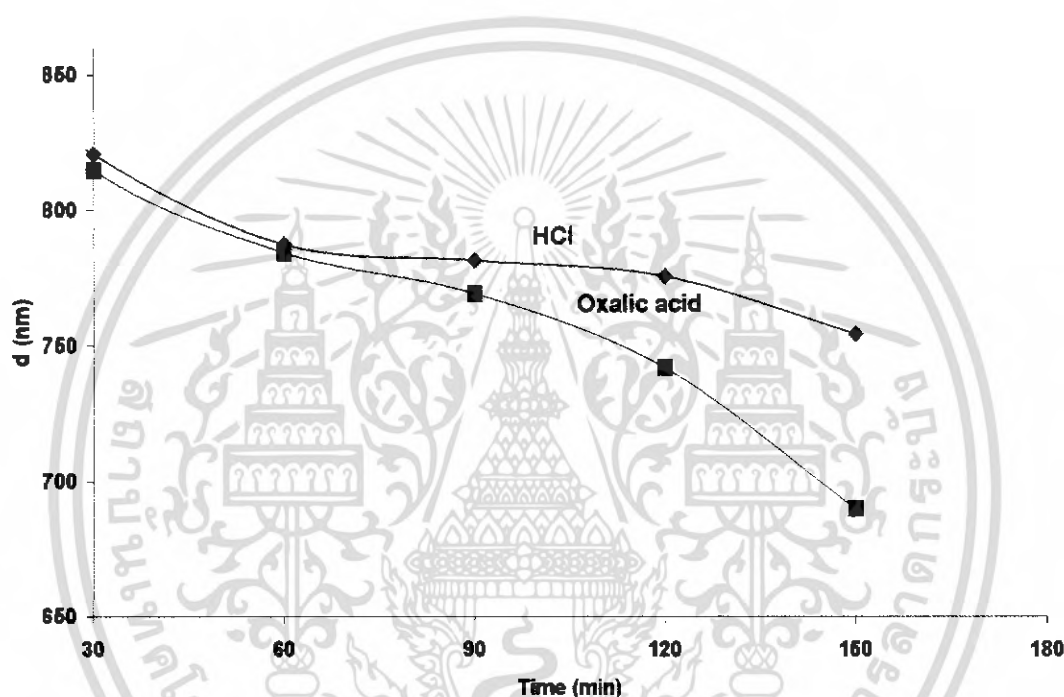
ตัวอย่าง	ความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ (nm.)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
1	876.17	876.17	876.18	876.18
2	815.15	839.55	821.23	815.15
3	793.75	802.95	787.65	784.58
4	788.65	787.65	781.53	769.33
5	781.55	767.88	775.43	741.85
6	775.43	757.13	754.05	689.93



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 และอุณหภูมิต่างๆ ของชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 เป็นผลจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิที่ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่า Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และชุดที่ 4

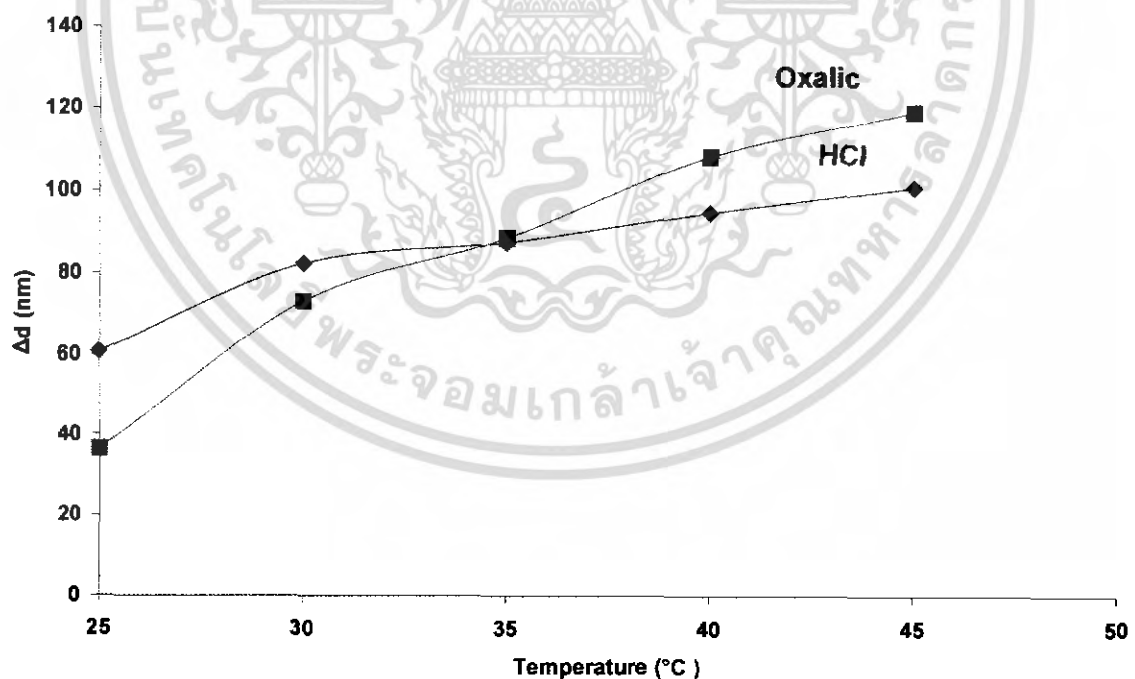
จากรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และชุดที่ 4 เป็นผลจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และเปลี่ยนเวลา 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที จะเห็นว่า Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl

4.7 ผลจากการหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้

การคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้จะคำนวณจาก $\Delta d = d_1 - d_2$ แสดงผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่กัดได้

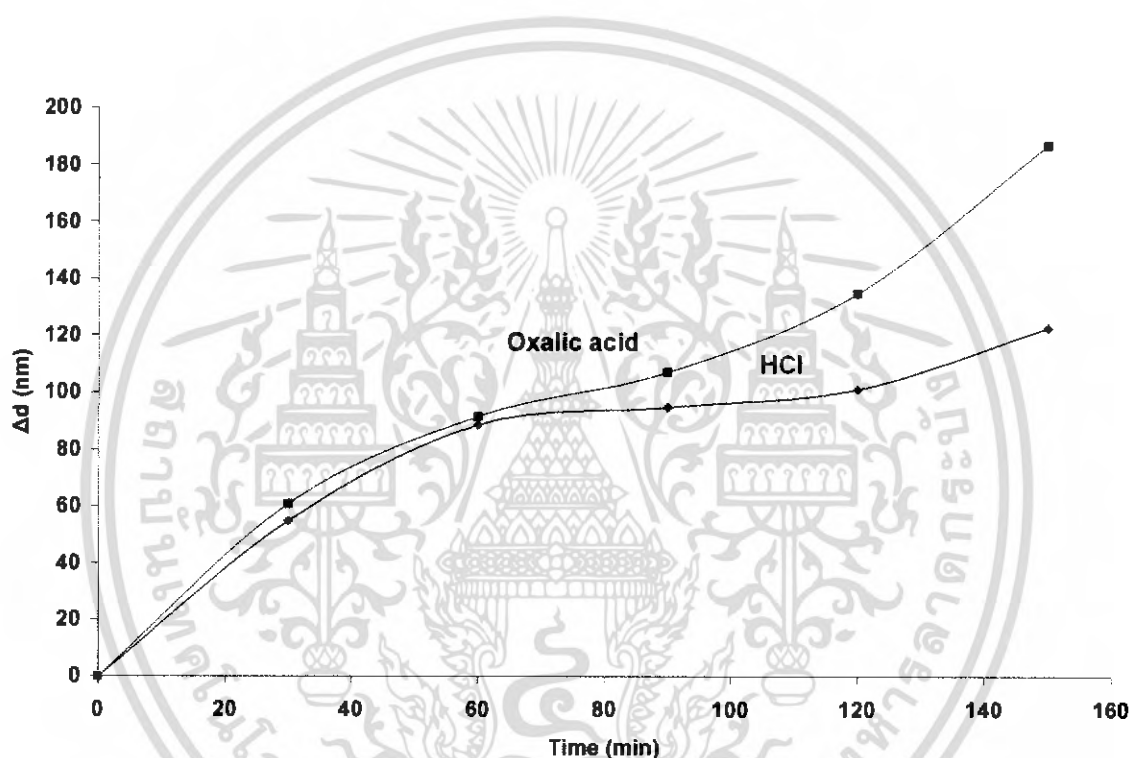
ตัวอย่าง	ความหนาของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่กัดได้ (nm)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
2	61.03	36.63	54.95	61.03
3	82.43	73.23	88.53	91.60
4	87.53	88.65	94.65	106.85
5	94.63	108.30	100.75	134.33
6	100.75	119.05	122.13	186.25



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และอุณหภูมิต่างๆของชุดที่ 1 และ 2 เป็นผลจากการวัดด้วยเครื่อง SEM เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ความเข้มข้น 0.35 โมล ควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่า ช่วงอุณหภูมิ 30°C-40°C HCl จะกัด ได้ดีกว่า Oxalic acid และช่วงอุณหภูมิ 40°C-45°C Oxalic acid จะกัด ได้ดีกว่า HCl



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4

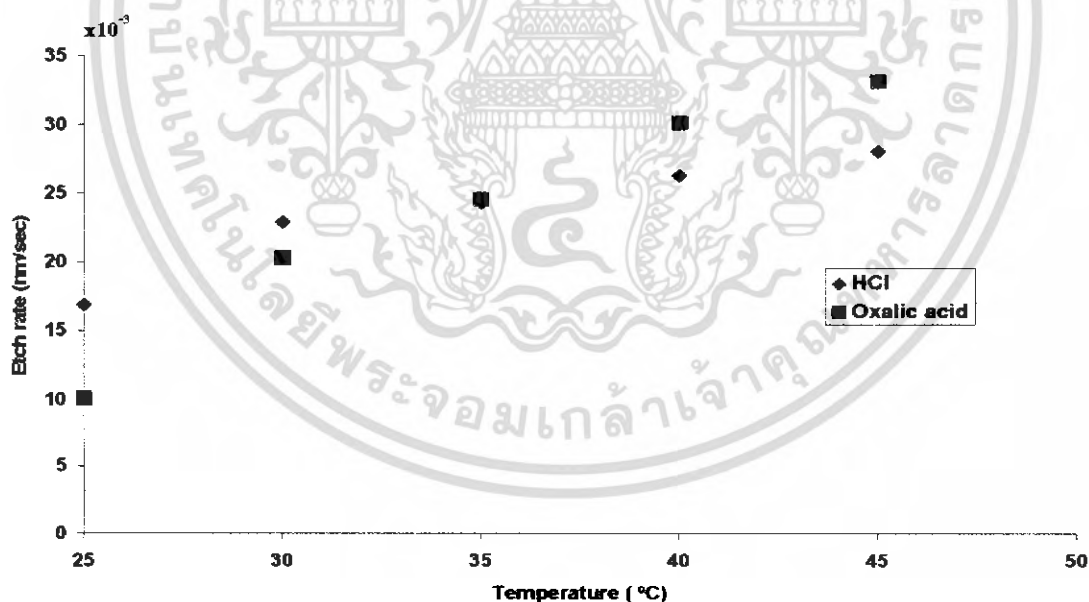
จากรูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่กัดได้และเวลาต่างๆของชุดที่ 3 และ 4 เป็นผลจากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C และเปลี่ยนเวลาเป็น 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที, 120 นาที และ 150 นาที จะเห็นว่า Oxalic acid จะกัด ได้ดีกว่า HCl

4.8 ผลจากการหาค่าอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂

เมื่อหาความหนาของฟิล์มบาง SnO₂ ที่ทำการกัดแล้วเราก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂ คำนวณจาก $\Delta d/t$ ได้ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการกัดของฟิล์มบาง SnO₂

ตัวอย่าง	อัตราการกัด (nm/sec)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
2	16.95×10^{-3}	10.17×10^{-3}	30.52×10^{-3}	33.90×10^{-3}
3	22.89×10^{-3}	20.34×10^{-3}	24.59×10^{-3}	25.44×10^{-3}
4	24.31×10^{-3}	24.59×10^{-3}	17.52×10^{-3}	19.78×0^{-3}
5	26.28×10^{-3}	30.08×10^{-3}	13.99×10^{-3}	18.65×10^{-3}
6	27.98×10^{-3}	33.06×10^{-3}	13.56×10^{-3}	20.69×10^{-3}

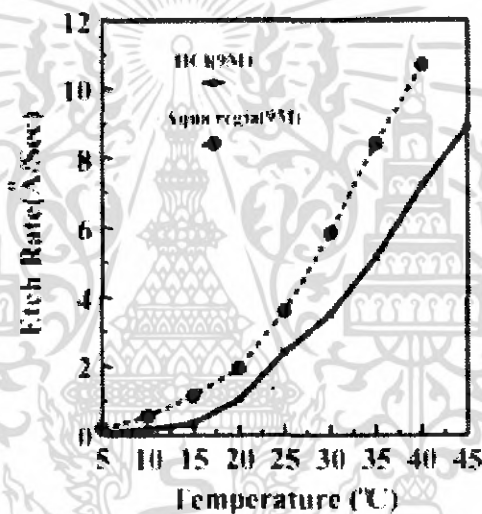


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิต่างๆเป็นผลการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและอุณหภูมิต่างๆเป็นผลการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย HCl และ Oxalic acid ที่ความเข้มข้น 36.5-38% และ 0.35 โมลตามลำดับ โดยควบคุมเวลา 60 นาที และเปลี่ยนอุณหภูมิ 25°C, 30°C, 35°C, 40°C และ 45°C จะเห็นว่า Oxalic acid จะกัดได้ดีกว่า HCl

จากการศึกษาของ C.J. Huang ซึ่งทำการศึกษาหาอัตราการกัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) แสดงรูปที่ 4.10

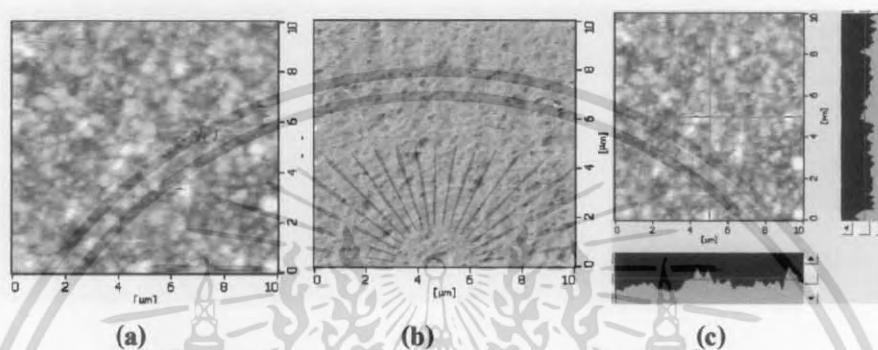


รูปที่ 4.22 แสดงอัตราการกัดและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกัด ที่ HCl 9 โมล และ aqua regia 9 โมล

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการกัดที่ได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด(SEM) จะเห็นว่ามิแนวนั้นไปทางเดียวกัน และการวัดเครื่อง UV-Visible ที่เกิดการผิดพลาดนั้น เนื่องจากการscattering หรือการดูดกลืนภายในชิ้นงานที่มีแผ่นฐานรอง ซึ่งฐานรองที่เราใช้เปรียบเทียบไม่เหมือนกับแผ่นฐานรองที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

4.9 การวิเคราะห์ผลพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง AFM

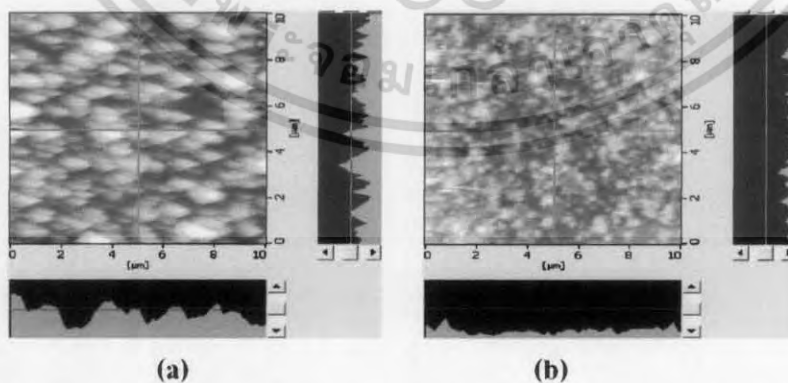
เป็นการวัดเพื่อจะดูความเรียบของพื้นผิว รูปที่ 4.2 เป็นรูปที่แสดงพื้นผิวก่อนที่จะไม่ได้กัด เพื่อนำผลที่ได้นี้ไปอ้างอิง กับรูปทำการกัด โดยมีเงื่อนไขต่างๆ ได้ผลออกมาดังนี้



รูปที่ 4.23 รูป(a)เป็นรูปวัดพื้นผิว รูป(b)เป็นรูปวัดเฟส และรูป(c)เป็นรูปดูความเรียบของพื้นผิวของฟิล์มบางที่ออกไซด์ที่ยังไม่ได้กัด

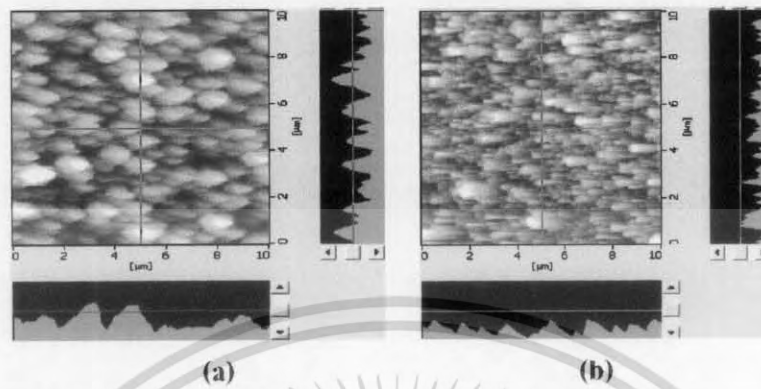
4.9.1 ผลที่ได้จากการกัดฟิล์มบางที่ออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เปรียบเทียบกับการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) อุณหภูมิต่างๆ

หลังจากที่เราทำการกัดฟิล์มบางที่ออกไซด์ด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl)และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid) ที่อุณหภูมิต่างๆ ถ้วนมาตัวอย่าง ไปวัดด้วยเครื่อง AFM แล้วนำมาเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิเดียวกัน ได้ผลดังนี้

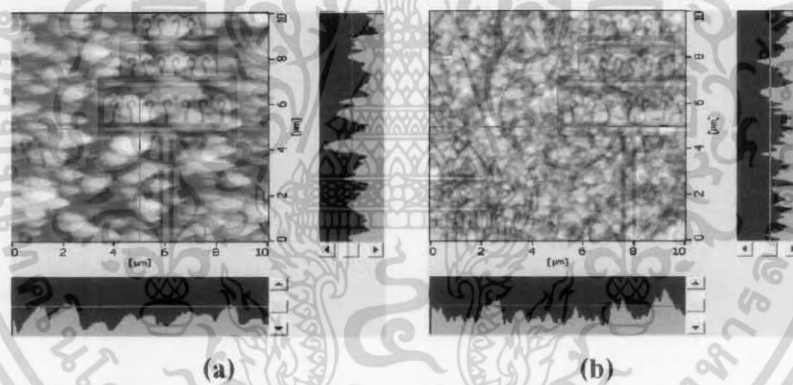


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วย กรดไฮโดรคลอริก(HCl)และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid)ที่อุณหภูมิ 25°C (a)การกัดโดยใช้ Oxalic acid (b) การกัดโดยใช้ HCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

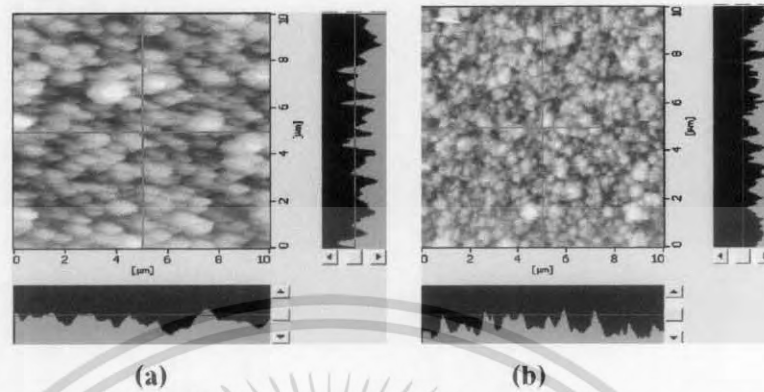


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบระหว่างการกัดกรดไฮโดรคลอริก(HCl)และ กรดออกซาลิก(Oxalic acid) ที่อุณหภูมิ 30°C (a)การกัดโดยใช้ กรดออกซาลิก(Oxalic acid) (b) การกัดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

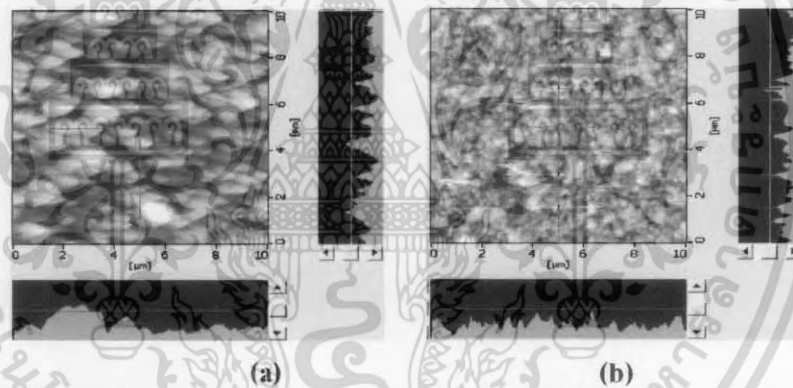


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) และ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 35°C (a)การกัดโดยใช้กรดออกซาลิก(Oxalic acid) (b) การกัดโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก(HCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) และ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่อุณหภูมิ 40°C (a)การกัดโดยใช้กรดออกซาลิก(Oxalic acid) (b) การกัดโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก(HCl)



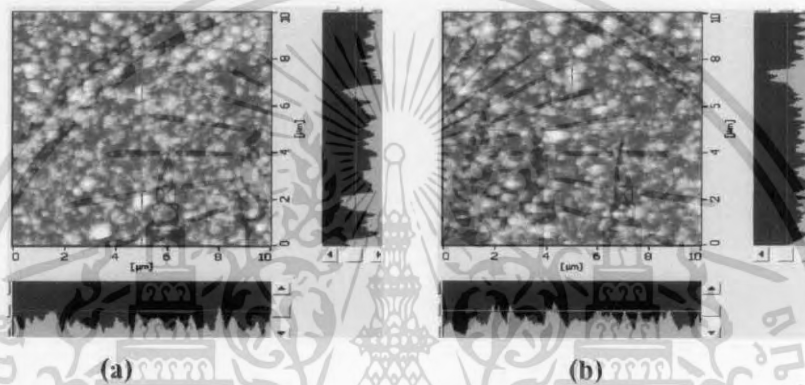
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl)ที่อุณหภูมิ 45°C (a)การกัดโดยใช้ กรดออกซาลิก(Oxalic acid) (b) การกัด โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl)

จากผลการวัดด้วยเครื่อง AFM เปรียบเทียบระหว่างกรดออกซาลิก(Oxalic acid) จะเห็นว่า การกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)ให้พื้นผิวที่เรียบกว่า การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)

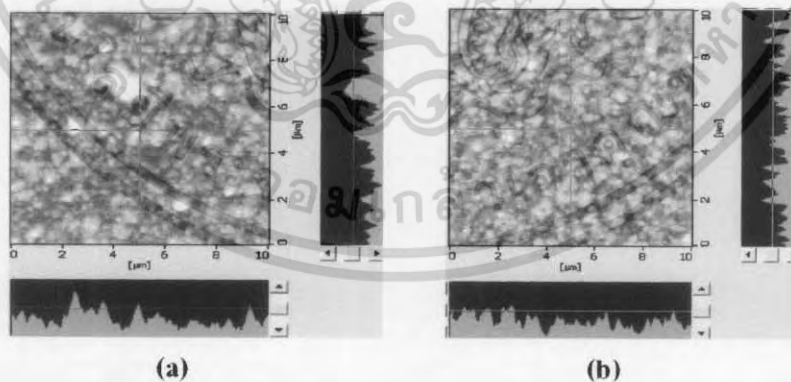
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.2 ผลที่ได้จากการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เปรียบเทียบกับ การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) ที่เวลาต่างๆ

หลังจากที่เราทำการกัดฟิล์มบางทินออกไซด์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)และ กรดออกซาลิก (Oxalic acid)ที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนนำตัวอย่างไปวัดด้วยเครื่อง AFM แล้วนำมาเปรียบเทียบกันที่เวลาเดียวกัน ได้ผลดังนี้

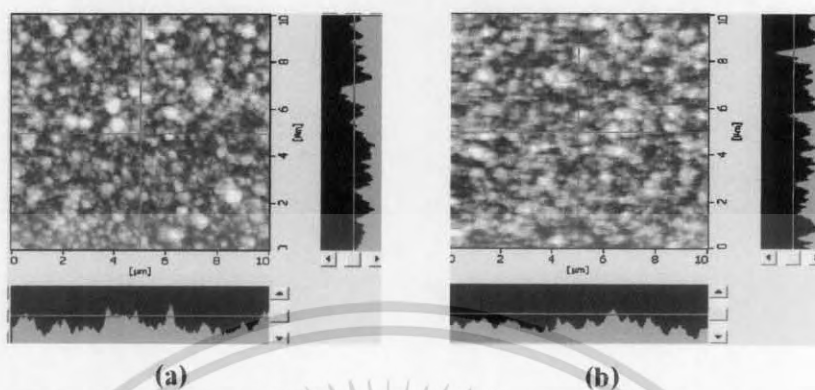


รูปที่4.29 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และ กรดไฮโดรคลอริก(HCl) โดยใช้เวลา30 นาที (a)การกัดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl) (b) การกัดโดยใช้กรดออกซาลิก (Oxalic acid)

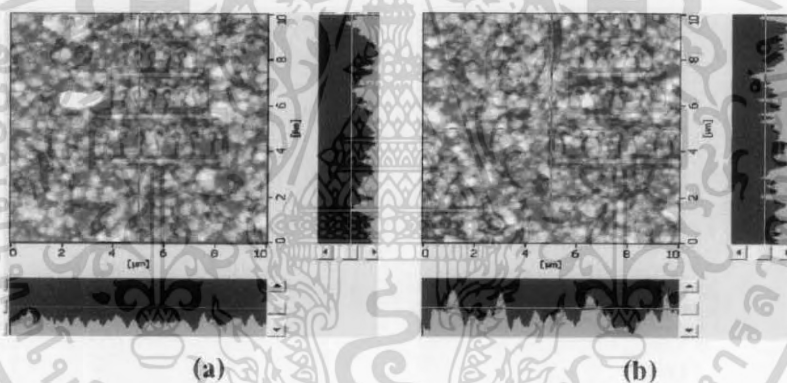


รูปที่4.30 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และกรดไฮโดรคลอริก (HCl)โดยใช้เวลา60 นาที (a)การกัดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl) (b) การกัดโดยใช้ กรดออกซาลิก (Oxalic acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

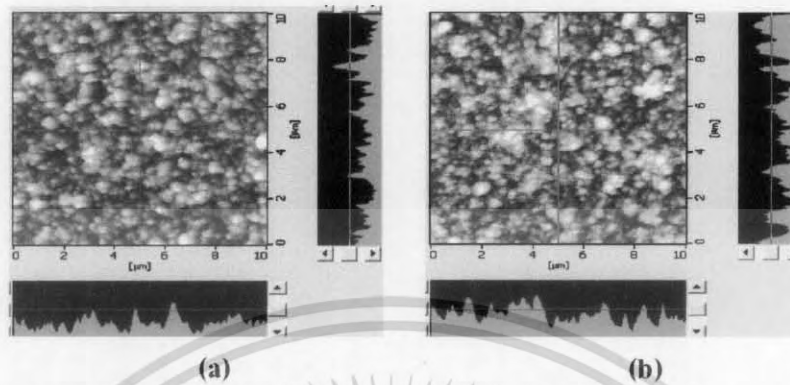


รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และกรดไฮโดรคลอริก(HCl) โดยใช้เวลา 90 นาที (a)การกัดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl) (b) การกัดโดยใช้ กรดออกซาลิก (Oxalic acid)



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และ กรดไฮโดรคลอริก(HCl) โดยใช้เวลา 120 นาที (a)การกัดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก(HCl) (b) การกัดโดยใช้กรดออกซาลิก (Oxalic acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบระหว่างการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และกรดไฮโดรคลอริก(HCl) โดยใช้เวลา 150 นาที (a)การกัดโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก(HCl) (b) การกัดโดยใช้กรดออกซาลิก (Oxalic acid)

จากผลการวัดด้วยเครื่อง AFM เปรียบเทียบระหว่างกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และกรดไฮโดรคลอริก(HCl) จะเห็นว่า การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid)และให้พื้นผิวที่เรียบกว่า การกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาโครงการพิเศษ

ในโครงการพิเศษนี้ศึกษาการกัดฟิล์มบาง SnO_2 โดยวิธีทางเคมี สารเคมีที่เลือกใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก(HCl) และกรดออกซาลิก(Oxalic acid) ซึ่งทำการศึกษาการกัดที่อุณหภูมิต่างๆ โดยควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการกัด และศึกษาการกัดที่เวลาต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิ เพื่อสังเกตว่าระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และกรดออกซาลิก สารเคมีชนิดใดสามารถกัดฟิล์มบาง SnO_2 ได้ดีกว่ากัน และสังเกตลักษณะของพื้นผิวหลังจากทำการกัด

จากผลการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible เพื่อหาความหนาของฟิล์ม SnO_2 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดจะเห็นว่า จากรูปที่ 4.11 เป็นการกัดที่ควบคุมเวลา 60 นาทีแล้วทำการเปลี่ยนอุณหภูมิพบว่า การกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl) นั้นจะมีอัตราการกัดที่สูงกว่าเมื่อทำการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) และจากรูปที่ 4.12 เป็นการกัดที่ควบคุมอุณหภูมิแล้วทำการเปลี่ยนเวลาพบว่า การกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) นั้นจะมีอัตราการกัดที่สูงกว่าการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก(HCl)

จากผลการวัดด้วยเครื่อง AFM เพื่อดูความเรียบของพื้นผิวจะเห็นได้ว่า การกัดโค่นใช้ HCl พื้นผิวจะเรียบกว่าการกัดด้วยกรดออกซาลิก(Oxalic acid) และอุณหภูมิที่ใช้ในการกัด ลักษณะของพื้นผิวจะเรียบที่สุดที่ 40°C และเวลาที่ใช้ในการกัดที่ทำให้ลักษณะของพื้นผิวเรียบที่สุดที่อุณหภูมิ 40°C คือเวลา 120 นาที

5.2 แนวทางในการพัฒนา

1. ศึกษาการกัดฟิล์มบาง SnO_2 เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก(HCl) และกรดออกซาลิก(Oxalic acid)
2. ศึกษาสารเคมีชนิดอื่นที่ใช้ในการกัดฟิล์มบาง SnO_2 เช่น Aqua regia เป็นต้น
3. ศึกษาวิธีวัดหาอัตราการกัดวิธีอื่นเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

1. J.E.A.M. van den Meerakker, P.C. Baarslag, W. Walrave, T.J. Vink, J.L.C. Daams, *Thin Solid Films* 266 (1995) 152.
2. J.Y. Park, H.S. Kim, D.H. Lee, K.H. Kwon, G.Y. Yeom, *Surf. Coat. Technol.* 131 (2000) 247.
3. J.E.A.M. van den Meerakker, P.C. Baarslag, W. Walrave, T.J. Vink, J.L.C. Daams, *Thin Solid Films* 266 (1995) 152.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้