

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส



นางสาวบุญเพ็ง ราชโยธา
นางสาวมณีนุชา มโนศิธรธรรม
นางสาวศิริพร จินศาสวัสดิ์

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

๒๖๖.
๑๕ 522 77
๑๖4Y

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 58668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการ
อื่น, เติมน, ป... 31 ต.ค. 2549
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๖๖.
๑๕ 522 77
๑๖4Y

Characterization of Spray Pyrolysis Deposited SnO_2 : Sb Thin Films



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 Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส	
นักศึกษา	นางสาวบุญเพ็ง	ราชโยธา
	นางสาวมนัญญา	มโนคติธรรม
	นางสาวศิริพร	ชินศาสวัต
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์	แก้วแดง
อาจารย์ร่วมที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์	แก้วแดง
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ
กรรมการ	รศ.อนุพงศ์	สรงประภา
กรรมการ	อ.ศ.ทิพวรรณ	คล้ายบุญมี

.....
(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส	
นักศึกษา	นางสาวบุญเพ็ง	ราชโยธา
	นางสาวมณัฏญา	มโนคติธรรม
	นางสาวศิริพร	ชินศาวัต
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์	แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริภักย์เกียรติ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียม และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่เจือด้วยอะตอมแอนติโมนี (Sb) โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส โดยเคลือบลงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอนติโมนี [$\text{SbCl}_3 / \text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ratio] เป็น 0.0 %, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, และ 4.0% โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบ เตตระโกนัล รูไทล์ และผลการศึกษายานาของเกรนจากความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุด (FWHM) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะมีขนาดอยู่ในระดับผลึกนาโนเมตร จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง พบว่าฟิล์มบางที่เจือแอนติโมนี 0.5% มีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านสูงสุดประมาณ 90% ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ สำหรับการศึกษสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแอนติโมนี และมีค่าอยู่ในช่วง $1.2 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$ ถึง $6.4 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ และจากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ พบว่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแอนติโมนีเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และค่าสภาพคล่องของพาหะมีอยู่ในช่วง $10^2 - 10^3 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Characterization of Spray Pyrolysis Deposited SnO ₂ : Sb Thin Films	
Name	Miss.Boonpeng	Rajchayotha
	Miss.Manatchaya	Manokatitham
	Miss.Siripron	Chinsaswat
Department	Applied Physics, Faculty of Science	
Program	Applied Physics	
Academic	2004	
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit	Gaewdang
Special Project co-advisor	Asst.Prof.Dr.Chaisingh	Poo-Rakkiat

ABSTRACT

In this special project, SnO₂ thin films doped with by the method of spray pyrolysis have been deposited on glass substrate at 400 ° C. The thin films are obtained from SbCl₃ / SnCl₄.5H₂O in methanol solutions at the following antimony concentrations 0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 wt%. X-ray diffraction pattern results show the presence of SnO₂ in the cassiterite structure with a tetragonal rutile, and results from FWHM with a grain size in the range of nano crystalline. Optical transmittance shows the best value around 90% in the visible region obtained from samples doped with 0.5 wt% of SbCl₃. For electrical properties the resistivity decreases when antimony concentration increases in range of $1.2 \times 10^{-2} \Omega\text{-cm}$ to $6.4 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$. Hall effect measurements on electrical properties at room temperature show that carrier concentration and mobility were $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ and $10^2 - 10^3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ respectively. As the antimony concentration increases, the carrier concentration increases but mobility decreases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องยูวี - วิสตีเบลแบบดับเบิลบีเอ็ม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101 PC ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 300 - 2500 nm)

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไธ และ คุณวิน บรรจงปรุ แห่งศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ FESEM ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S - 370 Scanning Microscope

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณกัญญา สิริโกชนัน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี - วิสตีเบลแบบดับเบิลบีเอ็ม ยี่ห้อ จัสโก 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV - Visible Spectrometer JASCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ต และย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง และให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องซังสารที่แสดงสเกลละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุมารใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Bruker

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 1.5406 \AA ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 6400 ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ เครื่องซังสารอิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง และชุดวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) และยิวี – วิสทิเบตแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลต และย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร และกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์แจ้งแหล่งจ่ายกระแสที่

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ, คุณจรินทร์ ไพธิไชยะ และคุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือ เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองสำหรับการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณอุปลัมภ์ นาครักษ์, คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์, คุณสุกฤษฎี เกิดแสง และคุณพิมพ์ ศิริพจนาวรรณ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการประดิษฐ์และซ่อมอุปกรณ์สเปรย์ไพโรไลซิส, แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณณัฐศักดิ์ เมฆจำเริญ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้กล้องดิจิทัลเพื่อใช้ในการถ่ายรูปของฟิล์มบาง และชุดอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชา ตั้งแต่การศึกษาภาค
บังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจน กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษา
เล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวบุญเพ็ง ราชโยธา

นางสาวมณัฎฐา มโนคติธรรม

นางสาวศิริพร ชินสาสวัต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 โครงสร้างของผลึก	4
2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างของผลึกในระบบ 3 มิติ	4
2.1.2 คำนีมิลเลอร์	4
2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคในผลึกจริง	5
2.1.4 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	6
2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	7
2.1.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์	10
2.2 สมบัติทางการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	10
2.2.1 การเกิดสีของผลึก	10
2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน	13
2.2.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	15
2.2.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	18
2.2.6 ทฤษฎีการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นตามขวางในตัวกลาง พลาสมาของโลหะใด ๆ	19
2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	22
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและ โฮล	22
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	23
2.3.2.1 วิธีวัดโดยตรง	23
2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	25
2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	26
2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะ ทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น	27
2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้ วิธีขั้วความร้อน	29
2.5 ปรากฏการณ์ของฮอลล์	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1 วิธีการทดลอง	34
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2	34
3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์	35
3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	37
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	37
4.2 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	37
4.3 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	41
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสง	44
4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทาน	46
4.6 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	49
4.7 ผลการศึกษาระหว่างค่าความหนากับเวลา	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุป	53
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57
ประวัติผู้เขียน	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนจากที่คำนวณได้จากกราฟ XRD และจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	42
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	44
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	44
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	49
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	49
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	51
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	52

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์	4
รูปที่ 2.2 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	5
รูปที่ 2.3 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนیل	6
รูปที่ 2.4 แสดงรูปเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 6400	7
รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	8
รูปที่ 2.6 แสดงรูปเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	9
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของแถบพลังงาน E - k ของสารชนิดต่าง ๆ	
(ก) ฉนวน	
(ข) กึ่งโลหะ	
(ค) โลหะ	11
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d	12
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 K)	
(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	14
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน กับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 K)	
(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	14
รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\epsilon(\omega) - \frac{\omega}{\omega_p}$ ในตัวกลางพลาสมาของโลหะใด ๆ	21
รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{cK}{\omega_p}$ ในตัวกลางพลาสมาของโลหะใด ๆ	22
รูปที่ 2.13 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ โดยวิธีวัดโดยตรง	24
รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	25
รูปที่ 2.15 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	

(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัดโดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า	26
รูปที่ 2.16 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน	29
รูปที่ 2.17 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์	30
รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรซิส	35
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	37
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	38
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนีส	39
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาคตัดขวางของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนีส	40
รูปที่ 4.5 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	42
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	43
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	43
รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2500 nm ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	45
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2500 nm ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	47
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	47
รูปที่ 4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	48
รูปที่ 4.13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	48
รูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	50
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	51
รูปที่ 4.16 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีความต้องการพลังงานทดแทนมากขึ้น เพราะพลังงานหลักซึ่งคือน้ำมันเริ่มมีปริมาณน้อยลง อีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่น่าสนใจ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อดีหลายประการ คือ สะอาดและไม่สร้างมลภาวะที่เป็นพิษขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ติดตั้งง่าย สามารถใช้งานได้ทันที และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งแตกต่างจากพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานปรมาณูซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีได้ ถ้าเกิดการรั่วไหล

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ สามารถเปลี่ยนพลังงานโฟตอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่เมื่อมีพลังงานโฟตอน ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) มาตกกระทบจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) [งามนิตย์, 2543; Kittel, 1971]

ฟิล์มบาง SnO_2 [Contreras, 1999] เป็นสารกึ่งตัวนำที่มี ค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง โดย SnO_2 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.54 eV มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลรูไทล์ ที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติเป็นฉนวน และฟิล์มบาง SnO_2 มีคุณสมบัติในการส่งผ่านแสงในย่านที่ตามองเห็น และสะท้อนแสงในย่านอินฟราเรด จึงทำให้ฟิล์มบางมีศักยภาพในการประดิษฐ์เป็นกระจกสะท้อนความร้อน (heat mirrors) หรือขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting electrode) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ $\text{SnO}_2 / \text{CdS} / \text{CuInGaSe}_2$ ให้มีประสิทธิภาพ ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงราว 18% ซึ่งฟิล์มบางของ SnO_2 จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางของ SnO_2 จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ดีควรมีความต้านทานต่ำ และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในย่านตามองเห็นได้มีค่าสูงๆ

การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี [Ramasamy, 1999; Bhosale, 2000; Patil, 2003] เช่น วิธีการสปีดเตอริง, วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ, วิธีการระเหยสารเคมี, วิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสเป็นวิธีที่มีข้อดี คือ สามารถเตรียมสารได้ขนาดใหญ่ตามต้องการ ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากนัก จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 นิยมเจือด้วยอะตอมของธาตุ F หรือ Sb เพื่อลดความต้านทาน สำหรับในปีที่ผ่านมาได้มีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{F}$ ขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยวิธีพ่นละออง สารเคมีแบบต่อเนื่อง [บุญประเสริฐ, 2546] และแบบไม่ต่อเนื่อง [งามนิษฐ์, 2547] โดยใช้สารละลายที่ เตรียมจาก $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, NH_4F และเอทานอล สำหรับโครงการพิเศษนี้ จะได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 เจือด้วย Sb โดยการใช้อัตตราโซนิค ช่วยทำให้เกิดไอของสารละลาย จากนั้นใช้ก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์พาไอสารเคมีไปตกลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อนอุณหภูมิ 400°C จากนั้นได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารเจือ และความหนาของ ฟิล์มบางที่มีต่อสมบัติการส่งผ่านแสง และความต้านทานไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) โดยการ ทำให้สารละลายระเหยกลายเป็นไอด้วยคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่ 1.7 MHz
2. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย Sb ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ
3. เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
4. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction method)
5. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง โดยวัดการส่งผ่านแสง (optical transmittance)
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และด้วยการศึกษาจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส โดยใช้วิธีการ ทำให้สารละลายระเหยกลายเป็นไอโดยใช้อัตตราโซนิคที่มีความถี่ 1.7 MHz เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูง จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือ และเพิ่มความหนาของฟิล์มบาง

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส โดยใช้วิธีการทำให้สารละลายระเหยกลายเป็นไอโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 1.7 MHz จัดเตรียมวัสดุต่าง ๆ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ บนกระจกสไลด์โดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีมีความหนาสม่ำเสมอ และติดแน่นดีกับกระจกสไลด์
3. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
4. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
5. ทำการศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง
6. ทำการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และด้วยการศึกษาจากปรากฏการณ์ฮอลล์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการ และวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ด้วย วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส โดยใช้วิธีการทำให้สารละลายระเหยกลายเป็นไอ โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 1.7 MHz
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็น ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

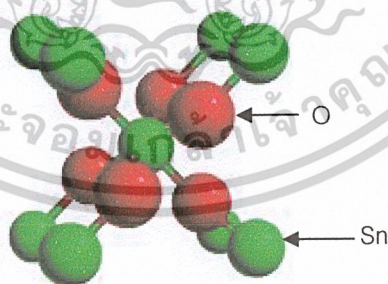
สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างเช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า, คุณสมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

2.1 โครงสร้างของผลึก

2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างของผลึกในระบบ 3 มิติ

[Kittel, 1971; งามนิศย์, 2547; Fantini and Torriani, 1986]

โครงสร้างผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้น โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะมีลักษณะโครงสร้าง แบบเตตระโกนัล รูไทล์ (tetragonal rutile) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์มีดีบุก (Sn) 2 อะตอม และมีออกซิเจน (O) 4 อะตอม มีการสร้างพันธะเคมีเป็นแบบรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าพันธะเคมีแบบ ออกตะฮีดรอน (octahedron) และมีจำนวนโคออร์ดิเนชัน นัมเบอร์ (coordination numbers) หรือจำนวนอะตอมเพื่อนบ้านที่อยู่ใกล้ชิดกับอะตอมที่พิจารณามากที่สุด (nearest neighbors) อยู่เท่ากับ 8



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์

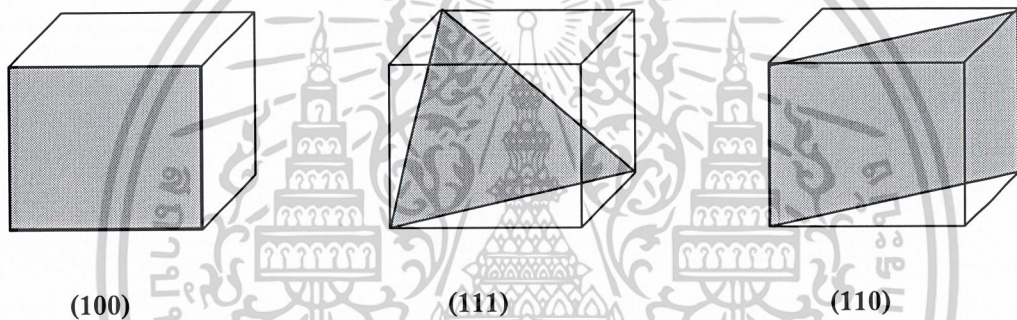
2.1.2 ดัชนีมิลเลอร์ [Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; จูตินัย, 2546]

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นในรูปของค่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่ชื่อ มิลเลอร์ (Miller) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะบอกด้วยค่าดัชนีที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h,k,l โดยใช้เครื่องหมาย (h,k,l)

$$h:k:l = 1/p : 1/q : 1/r \quad (2.1)$$

เมื่อ p,q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a,b,c ตามลำดับ นั่นคือ h,k,l จะเป็นตัวเลขเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับระยะตัดแกนผลึก a,b,c ตามลำดับ ซึ่งก็คือดัชนีมิลเลอร์นั่นเอง



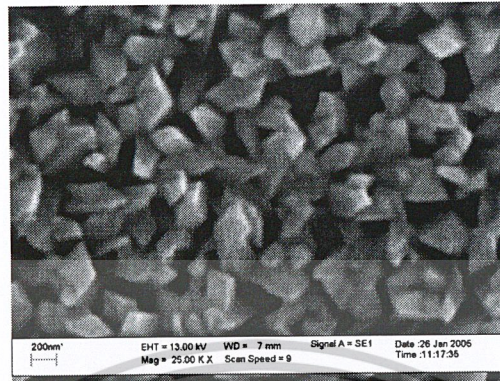
รูปที่ 2.2 แสดงดัชนีมิลเลอร์ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง (real crystal) [Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543]

ผลึกจริง (real crystal) เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบวาแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซบstituชัน (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึก อีกทั้งยังมีเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) หรืออาจทำหน้าที่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุ หรืออาจทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินของประจุ ดังนั้นจึงอาจมีผลทำให้การนำกระแสของประจุเปลี่ยนแปลงไป เขตรอยต่อของเกรนอาจทำหน้าที่เป็นกับดักประจุกักอะตอมโมเลกุล หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนของสารบางตัวไว้



รูปที่ 2.3 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนีสล

2.1.4 วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [วิรุพห์ และสุวิทย์, 2543]

โดยทั่วไป เครื่องมือล้ำยุคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายชนิดหนึ่งเพื่อใช้ดูภาพ 3 มิติบนผิวหน้าเว่นผลึก คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope เรียกว่า SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การทำงานของกล้องลักษณะนี้จะจะไม่ขึ้นกับแสงแต่จะใช้ลำอิเล็กตรอนในการสแกนลงบนตัวอย่างชิ้นสารที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศซึ่งดูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศ ลำอิเล็กตรอนจะเกิดจากการทำให้คาโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออก จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูง (5 – 50 keV) และถูกโฟกัสให้เป็นลำที่เล็ก อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะทำให้เกิดไอออนและปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มีพลังงานต่ำ (≈ 50 eV) จากชั้นผิวหน้า (หนา ≈ 50 nm) ของตัวอย่างสาร อิเล็กตรอนปฐมภูมิหนึ่งตัวอาจทำให้มีอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิน 1 ตัวหลุดจากผิวหน้าได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะทำลำอิเล็กตรอนมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กมาก และมีการแยกชัดที่ดี (high resolution)

วิธีการวิเคราะห์ผิวหน้าด้วย SEM ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมตัวอย่างสารเป็นพิเศษและไม่มีความอันตรายเนื่องจากการใช้เครื่องมือ อย่างไรก็ตามหากเป็นกรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าจะมีประจุลบสะสมอยู่บนผิวหน้าซึ่งจะลดการแยกชัดของภาพลง ในกรณีเช่นนี้ก่อนอื่นจะต้องทำการเคลือบชั้นนำไฟฟ้าบาง ๆ (ปกติมักใช้ Au) ลงบนผิวหน้าสาร อัตราขยายภาพสามารถหาได้จากอัตราส่วนของภาพบนจอมอนิเตอร์ต่อความยาวของส่วนที่ถูกสแกน และอาจมีค่าสูงถึงแสนเท่าสำหรับ การแยกชัดจะถูกจำกัดโดยขนาดของลำอิเล็กตรอน ที่ต้องโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาดของลำอิเล็กตรอนก็จะถูกกำหนด โดยการแผ่กระจายพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยด้วยความร้อน ซึ่งจะถูกจำกัดขนาดให้มีค่า $\approx 8 \text{ nm}$ ในกรณีที่ต้องการให้มีการแยกชัดที่ดีควรลดกระแสนของลำอิเล็กตรอนลง และความลึกของสนาม (depth of field) ควรจะมีค่า $\approx 1 \mu\text{m}$ อันที่จริงแล้วหากมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่เครื่องมือ SEM จะทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้นอีกมากจากการใช้เครื่องมือดังกล่าวและหนึ่งในจำนวนเครื่องมือที่มีประโยชน์มากก็คือเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแจกแจงพลังงาน [energy dispersive spectroscopy (EDS)] ที่ค่าพลังงานลำอิเล็กตรอนที่สูงขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในๆ เกิดการแตกตัวเป็นไอออน หลังจากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) โดยการปล่อยรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นแสงสีเดียว (คลื่นความถี่เดียว) คลื่นที่ปล่อยออกมาจะแสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบทางเคมีแต่ละองค์ประกอบ ดังนั้นเครื่องมือ EDS สามารถใช้เพื่อหาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าสาร การวัดด้วยเครื่องมือนี้ปริมาตรของชิ้นสารที่จะใช้ตรวจสอบจะต้องมีขนาดค่อนข้างใหญ่และต้องมีพื้นที่ผิวเล็ก $\approx 1 (\mu\text{m})^2$



รูปที่ 2.4 แสดงรูปเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 6400

2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

[Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิษฐ์, 2543; จูตินัย, 2546]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง $0.2 - 2 \text{ \AA}$ ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ หรือน้อยกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq 2d$ หรือความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (inter-atomic spacing) คือให้ $\lambda \approx 10^{-8}$ cm หรือ $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ ตกกระทบผลึกที่ทำหน้าที่คล้ายเกรตติง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริม และหักล้างกัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า “กฎของแบรกก์” ดังสมการ

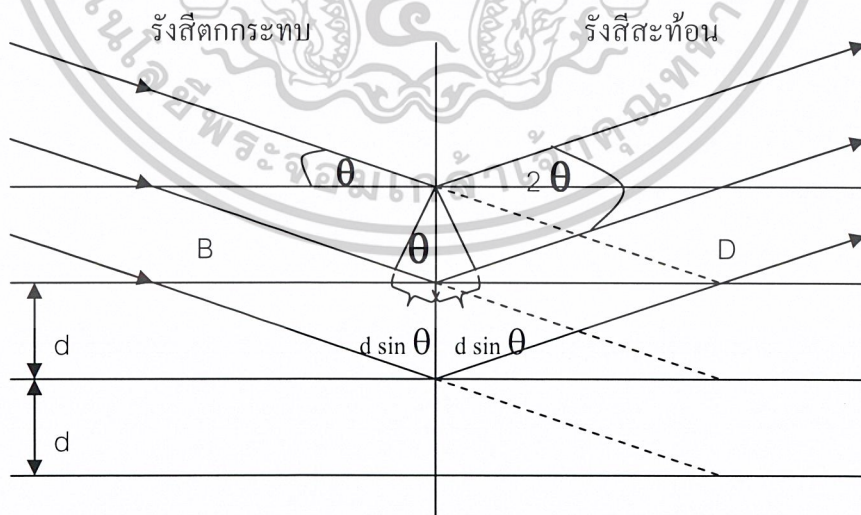
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดย

$$\lambda (\text{\AA}) = \frac{12.4}{E(\text{KeV})} \quad \text{และ} \quad E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ

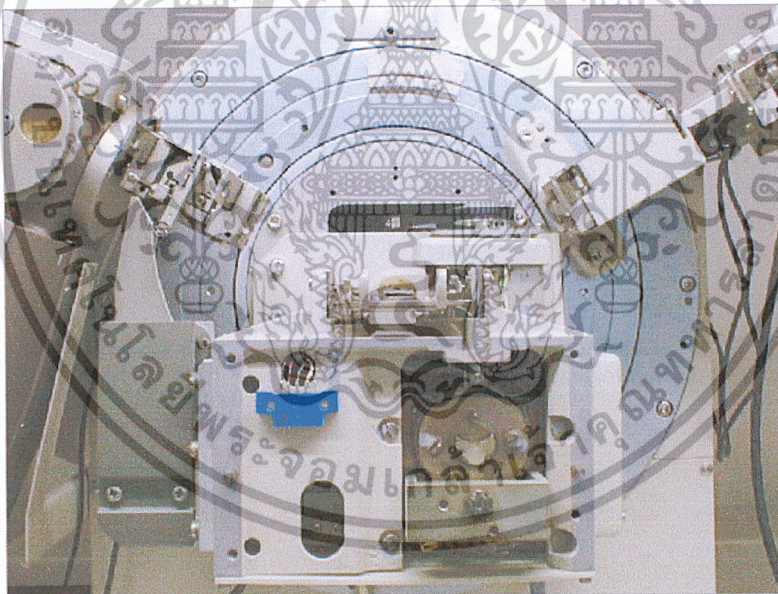
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
- θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
- n คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
- h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (plank constant)



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction method) เป็นวิธีที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยว ที่ทราบความยาวคลื่น เมื่อลำรังสีไปตกกระทบหรือชิ้นงานวัตถุ และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีตัวหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบ และธาตุที่มีส่วนผสม หรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ที่มุมต่าง ๆ กันเปรียบเทียบกับ ข้อมูลที่เป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุที่ได้ นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาศึกษาความเป็นผลึกเชิงคุณภาพ ขนาดของเกรน และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่างได้อีกด้วย จากหลักการทำงานของเครื่อง XRD (X-rays diffraction method) ดังรูปที่ 2.6 มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตร โครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน



รูปที่ 2.6 แสดงรูปเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์

[Kittel, 1971; Fantini and Tirriani, 1981]

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึก สามารถไปคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ จัดอยู่ในรูปแบบผลึกแบบเตตระโกนัล บอดีเซ็นเตอร์ โดยที่ $a = b \neq c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}} = \sqrt{\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}} \quad (2.3)$$

2.2 สมบัติทางการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

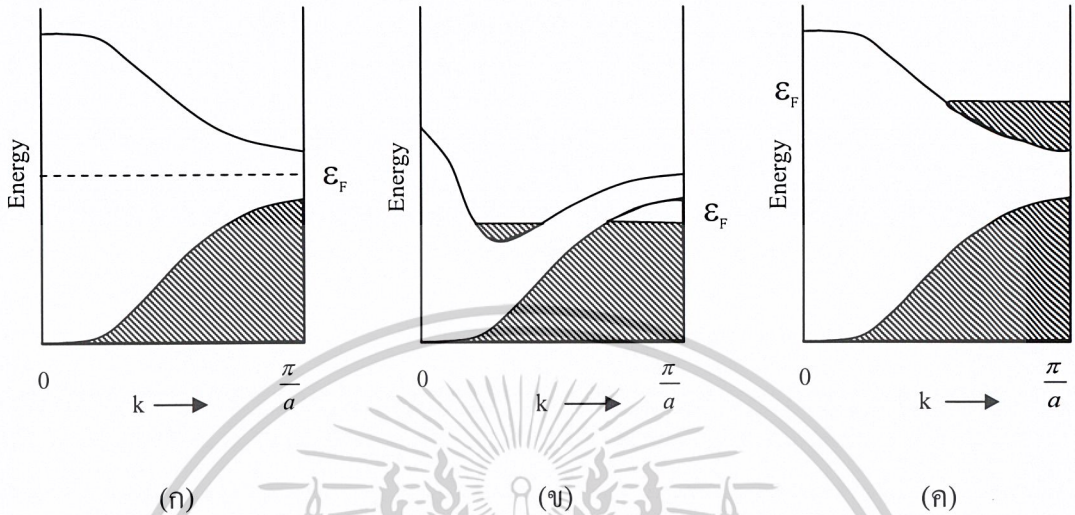
การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของการเกิดสีของผลึก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ SnO_2 ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำ และนำมาทำการคำนวณขนาดช่องว่างของแถบพลังงาน

2.2.1 การเกิดสีของผลึก [Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ เป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตลุดอมบี้นี้ยวไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย และแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้วระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย และเรียกบริเวณนี้ว่า “ บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap) ” ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องนั้นว่า แถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g นำมาใช้แบ่งแยกสารชนิดต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3 \text{ eV}$ สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3 \text{ eV}$ และตัวนำมีแถบวาเลนซ์ และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของแถบพลังงาน $E - k$ ของสารชนิดต่างๆ

(ก) ฉนวน

(ข) กึ่งโลหะ

(ค) โลหะ

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกด้วยการมีสีของผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน ออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่น ถ้าพิจารณาฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_0 แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_t ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient : α) ได้จากสมการที่ (2.4) และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับพลังงานโฟตอนได้นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วย ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha d) \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

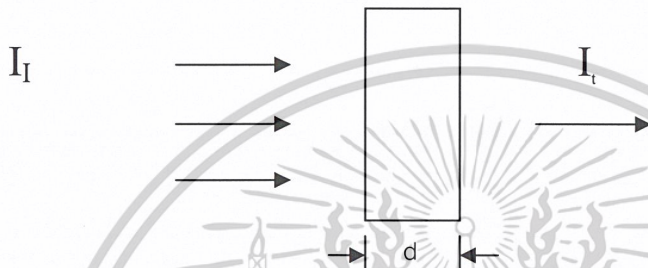
เมื่อ

I_t = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

I_0 = ปริมาณความเข้มแสงที่ถูกตกกระทบสารตัวอย่าง

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธี ทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาข้างต้น คือการสร้างสถานะพื้นฐานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง คือ

1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก Al_2O_3 เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้มหรือที่เราเรียกว่า ทับทิม (ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียงแค่ 0.5% ไอออน Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงินที่เราเรียกว่า แซฟไฟร์ ได้แก่ มรกต บุษราคัม นิล เป็นต้น

2. การระดมยิง (bombard) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอน หรือโฮล ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี

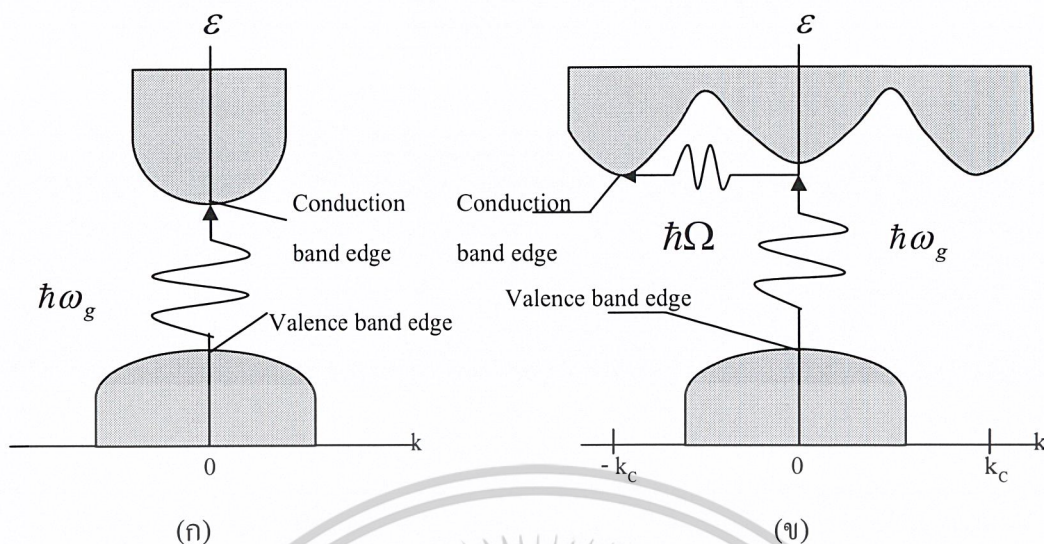
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคจะละเอียดมากขึ้น บนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้น คือ เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราเห็นผลึกมีสีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

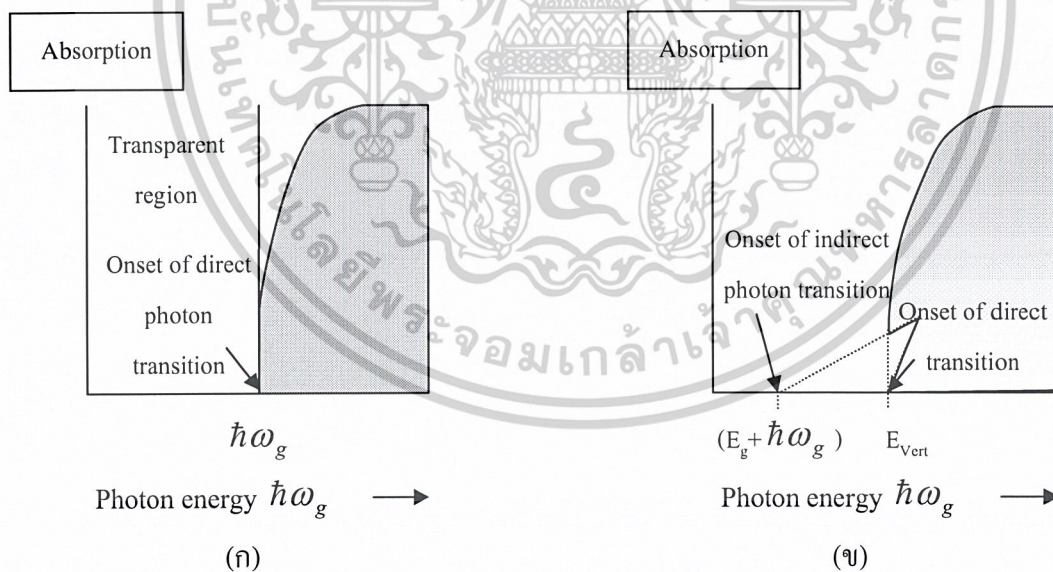
2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของ

อิลีคตรอน [Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำ กับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น (wave vector) ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิลีคตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับ หรือมากกว่า ขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิลีคตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้น และอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิลีคตรอน และโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.10 (ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิลีคตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้ มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิลีคตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ จะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω ซึ่งจะมีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมาจึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และอิลีคตรอน และโฮลอิสระ (E_{con}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน กับพลังงานโฟตอน จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 2.10 (ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโครงผลึกจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิดการสั่น และสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิลีคตรอนจะดูดกลืนโฟนอน แล้วตามด้วยกระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนมีค่าเท่ากับ $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ อิลีคตรอนที่อยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงาน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิลีคตรอนและโฮลอิสระต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง กรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [สิงหเดช, 2539]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีสภาพของแม่เหล็ก ($\mu = 1$) จะได้สมการคลื่นเป็น

$$E = E_0 \exp[i(k * r - \omega t)] \quad (2.5)$$

$$H = H_0 \exp[i(k * r - \omega t)] \quad (2.6)$$

เมื่อ

E คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0

H คือ สนามแม่เหล็กที่มีแอมพลิจูด H_0

K = $k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดยที่

k_1 คือ เวกเตอร์จริง k_2 คือ เวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k * k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

c คือ ค่าความเร็วแสง

t คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่น และความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - iK \quad (2.7)$$

โดยที่

n คือ ดัชนีหักเห

K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

$$|k_1| = n\omega/c \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|k_2| = n\omega/c \quad (2.9)$$

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศ x เป็น

$$E_x = E_{0x} \exp[i\omega(n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (2.10)$$

E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง x

จากสมการที่ (2.10) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$I \propto EE^* \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \propto E_0^2 \exp(-2\pi kx/c)$$

หรือ

$$I = I_0 \exp(-4\pi kx/\lambda)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha X) \quad (2.12)$$

โดยที่ $\alpha = 4\pi kx/\lambda$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x

I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ (nm)

จากสมการที่ (2.12) เขียนได้ใหม่เป็น (2.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dX} \right) \quad (2.13)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.13) คือ อัตราการลดลงของความเข้มขึ้นแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

2.2.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

[Abelas, 1972; สิงหเดช, 2539; งามนิตย์, 2543; ฐิติณัย, 2546]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งเรียกว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรงดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) โดยสารกึ่งตัวนำ SnO_2 มีการย้ายสถานะพลังงานในกรณีนี้ และการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าอุปคัลลเมตริกซ์ออปติคัล (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าว คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้ามและถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืน เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบยินยอม และแบบต้องห้ามได้ ดังนี้คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned} (\alpha_{hv}) &= \frac{sc\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &= A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.14)$$

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = \frac{sc\hbar}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 58668 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= A(h\nu - E_g)^2 \quad (2.15)$$

โดยที่ μ	คือ มวลลดทอน (reduced electron-hole mass)
H_{cv}	คือ ออปติคัลเมทริกซ์อีลิเมนต์ (optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ
E_g	คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
$h\nu$	คือ พลังงานโฟตอน
n	คือ ดัชนีหักเห

2.2.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

[Abelas, 1972; สิงหเดช, 2539; งามนิตย์, 2543; จิตินัย, 2546]

สำหรับการทดลองของเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission : %T) ผ่านสารตัวอย่างโดยที่พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ (I_0) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (I_t) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น (λ) ดังแสดงดังรูปที่ 2.8 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = I_t / I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) / [1+R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad (2.16)$$

$$R = I_r / I_0 = [(n-1)^2 + K^2] / [(n+1)^2 + K^2] \quad (2.17)$$

โดยที่ T	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
R	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน
α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
I_t	คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบาง
I_0	คือ ความเข้มของแสงตกกระทบฟิล์มบาง
d	คือ ความหนาของฟิล์มบาง
n	คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง
K	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนามากพอที่ $R^2 \exp(-2\alpha d)$ ค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (2.16)

จะเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = I_t / I_i = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2.18)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R^2)$ มีค่าคงที่ และสมการที่ (2.18) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln(I_i / I_t) \quad (2.19)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (2.2) ยังคงมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องกับด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (α_0) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้นเพื่อให้ง่ายขึ้น ในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (2.4) และเราสามารถหา E_g ได้จากสมการที่ (2.14) หรือ (2.15) หรือทำได้โดยการลากเส้นตรงโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั้นเอง และลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังที่แสดงอยู่ในรูป 2.10 (ก) และ (ข)

2.2.6 ทฤษฎีการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสมาของโลหะใด ๆ

[Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; จูตินัย, 2546]

พลาสมา (plasma) คือ ตัวกลางใด ๆ ที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าที่มีจำนวนประจุบวก (+) และประจุ (-) เท่ากัน และอย่างน้อยต้องมีประจุชนิดหนึ่งเคลื่อนที่ได้ ยกตัวอย่างเช่น พลาสมา ในตัวกลางโลหะใด ๆ ประจุบวก คือ ไอออนคอร์ที่ฝังตัวอยู่กับที่ และประจุลบ คือ อิเล็กตรอนอิสระ (conduction electrons) หรือทะเลอิเล็กตรอน (electron sea) ที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในตัวกลางเนื้อโลหะนั้นเอง

พลาสมอน (plasmon) คือ พลังงานที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง (quantization energy) ที่เกิดจากการสั่นของพลาสมา

การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นตามขวาง ในตัวกลางพลาสมาของโลหะใด ๆ ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของพลังงานโฟตอน (photon frequency : ω) และความถี่ของพลาสมาในตัวกลางโลหะใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(plasma frequency : ω_p) ดังแสดงตามสมการที่ (2.20) – (2.22) และดังแสดงในรูปที่ 2.11 – 2.12
เมื่อพิจารณาในหน่วย SI (SI unit) จะได้ว่า :

$$\varepsilon(\omega) \equiv 1 - \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m \omega^2} \quad (2.20)$$

$$\omega_p^2 \equiv \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon(\omega) \equiv 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.22)$$

โดยที่ : $\varepsilon(\omega)$ = ค่าฟังก์ชัน ไดอิเล็กตริก (dielectric function) ของอิเล็กตรอนในตัวกลางโลหะ
ที่ความถี่ค่าใด ๆ

ε_0 = ค่าสภาพยอมให้สนามไฟฟ้าผ่านได้ในสุญญากาศ (permittivity in vacuum)

n = ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron carriers concentration)

m = ค่ามวลยั้งผล (effective mass) ของอิเล็กตรอน

ω = ค่าความถี่ของพลังงานโฟตอน

ω_p = ค่าความถี่ของพลาสมาในตัวกลางโลหะใด ๆ

เมื่อ : $0 < \omega < \omega_p$; $\varepsilon(\omega)$ มีค่าเป็นลบ (-) คือ จะมีเพียงคลื่นตามยาว (longitudinal wave) สามารถ
ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางได้แต่คลื่นตามขวาง (transverse
wave) จะไม่สามารถส่งผ่าน เข้าไปในตัวกลางได้ จะเกิด
การสะท้อนกลับหมด (totally reflection) เนื่องจากจะมี
ฟังก์ชันคลื่นเป็นแบบ $\sim \exp[-|K|d]$ เมื่อ $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ โดยที่
 K คือ เวกเตอร์คลื่นของโฟตอน, λ คือ ความยาวคลื่น
ของโฟตอน และ d คือ ความหนาของฟิล์มบางด้วยเหตุนี้
ถ้าฟิล์มบางมีความหนา (d) $\leq \lambda$ คลื่นตามขวางจึงจะ
สามารถส่งผ่านเข้าไปในฟิล์มบางได้

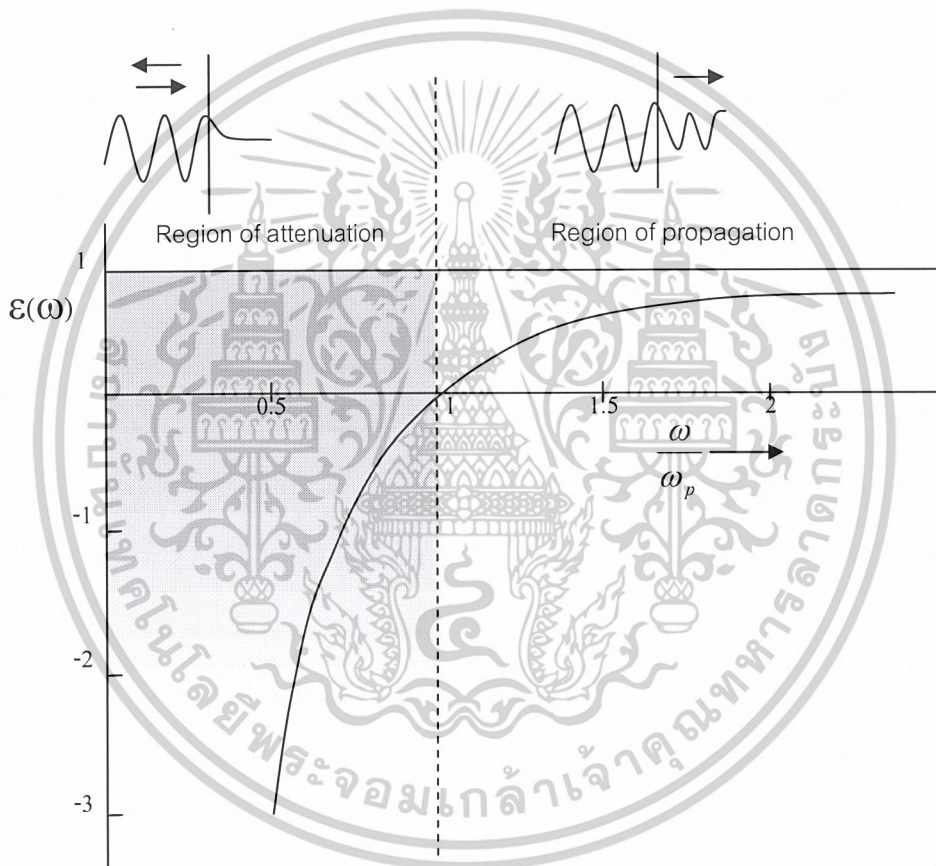
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega = \omega_p ; \epsilon(\omega) = 0$$

คือ จะเป็นกรณีที่เกิดคลื่นตามขวาง เริ่มถูกสะท้อนออกจากตัวกลาง จะมีเพียงคลื่นตามยาวเท่านั้นที่สามารถส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางได้

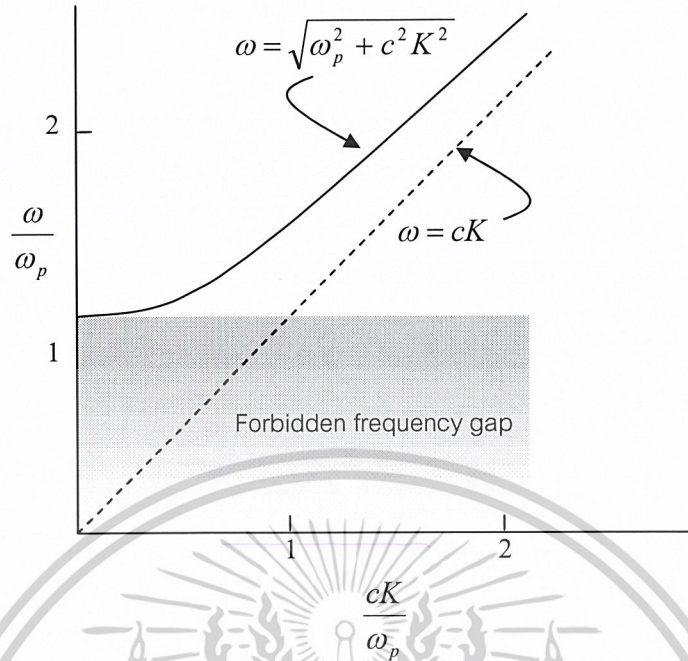
$$\omega > \omega_p ; \epsilon(\omega) \text{ มีค่าเป็นบวก (+)}$$

คือ จะเป็นกรณี ที่มีทั้งคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง สามารถส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางได้



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\epsilon(\omega) - \frac{\omega}{\omega_p}$ ในตัวกลางพลาสมาของโลหะใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{cK}{\omega_p}$ ในตัวกลางพลาสมาของโลหะใด ๆ

2.3 สมบัติทางไฟฟ้า [Runya, 1975; อารีย์, 2543]

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า $2 e V$ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงาน ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้ และพลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

จาก $\mu = v_d/E$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอน และโฮลแถบวาเลนซ์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (2.23)$$

เมื่อ μ_n และ μ_p คือสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ และ v_d คือ ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) กับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity : ρ) มีค่าเป็น $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามักเป็นไปตามสมการ

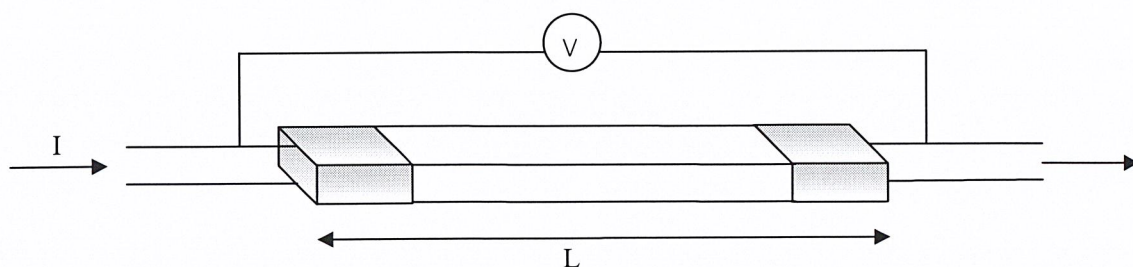
$$\sigma = 1/q(\mu_n + \mu_p) \quad (2.24)$$

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนตัวของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.3.2.1 วิธีวัดโดยตรง (direct method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า มักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง หมายถึงการวัดค่าความต้านทานรวมของสาร แล้วถึงมาคิดความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารที่ต้องการวัด วิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอนเพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัด และความยาวให้ได้แน่นอน เช่น ทรงกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดโดยตรง

จากค่าที่ทราบ คือกระแส และศักย์ไฟฟ้านี้นำมาคำนวณหาค่า ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ และพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่วัด

$$R = \rho l / A \quad (2.25)$$

$$\rho = R(A / l) = (VI)(A / l) \quad (2.26)$$

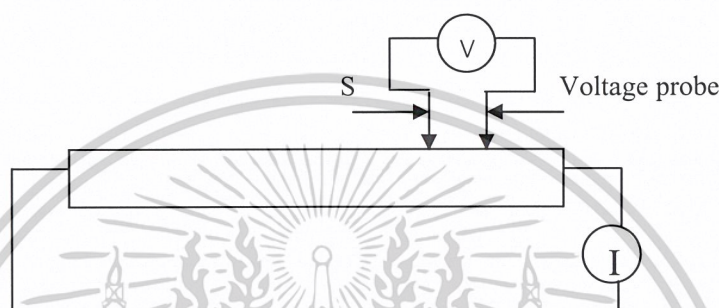
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วยกัน

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้า และออกนั้นเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี มักจะมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริง ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัด และความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้ว จะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าค่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์เพราะที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ดีนั้นจะตรวจสอบได้ยากกว่า จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง ๆ ถ้าทำเช่นนี้ค่าผิดพลาดก็จะน้อยมาก

2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe method)

การวัดด้วยวิธีนี้ มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัดโดยตรง แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสารตัวอย่าง เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้า และกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้ จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณนั้น ทำให้การวัดความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equipotential line) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าอยู่ในแนวเส้นสมศักย์ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้า - ออกจะต้องมีค่ามากกว่า 3 เท่า $I > 3A$ เมื่อ I คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วหลาย ๆ ตำแหน่งนี้สามารถแยกความต้านทานจำเพาะสภาพผิวระหว่างโลหะ กับสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้นหรือสี่ขั้วเชิงเส้น

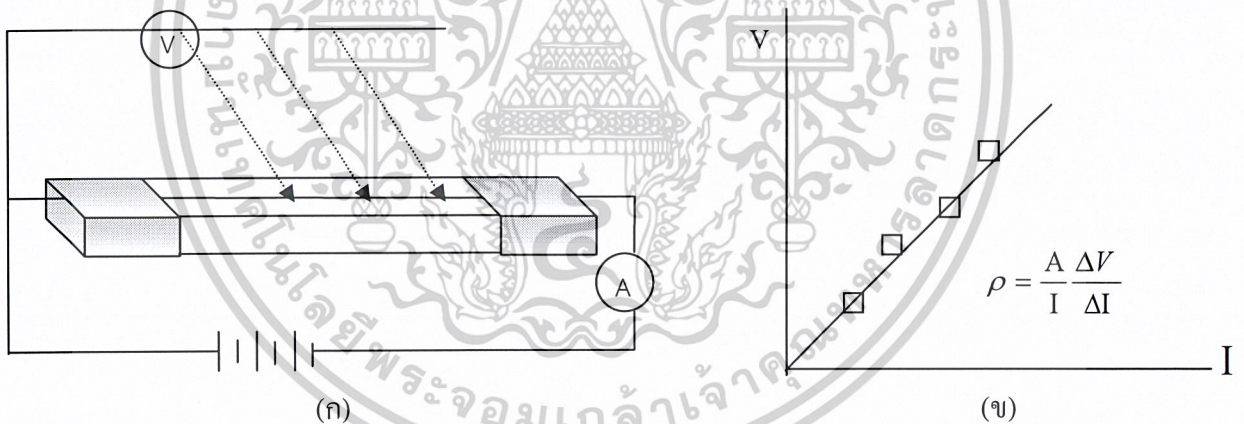
- วัดศักย์ที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่าง และห่างจาก บริเวณกระแสเข้า - ออกพอสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์บนสารกึ่งตัวนำนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็ง และนำไฟฟ้าได้ดี เช่น แพลทินัม ทังสแตน เงิน เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่างจะต้องทราบระนาบ หรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่าง ว่ากำลังวัดอยู่บนระนาบใด หรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องเป็น ผลึกสัมบูรณ์มีเกรนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรนที่ผิว และมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลาย ๆ จุด และจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจจะทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- วัดบนสารที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไขด้วยวิธีครึ่งที่ขั้วหนึ่ง และอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะ แล้วนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method)

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น เป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรมวิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้ว ซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วมีปัญหาอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 จุด และ 4 จุด คล้าย ๆ กัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่าง ๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้า - ออก ตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนที่มีลักษณะเส้นเล็ก และแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกันจัดให้เท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะพอ จะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริง ๆ แล้วจะใช้การหาศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการพัวซอง ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาค่านำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะ โดยทั่วไปแล้วจะหาได้จากกระแสที่ลัดเข้าไปในสารตัวอย่าง และวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง — จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานเฉพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะโดยสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ

- 1) ขั้วทั้งสองต้องมีลักษณะ มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย

- 2) สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้งสองที่วางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (hemisphere) โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิต เมื่อมีการวัดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่าง จะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใด ๆ ได้

$$V = K/r \quad (2.27)$$

เมื่อ r คือระยะใด ๆ ที่จะหาศักย์ที่จุดที่ให้กระแส และ K คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของกระแสที่ลัดเข้าไป และรูปร่างของสารตัวอย่าง

2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น

ถึงแม้ว่าการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มาตรฐานมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ซึ่งพอจะสรุปเป็นข้อย่อ ๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้ รวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่าง ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่วางหัววัดได้ และรูปทรงของสารตัวอย่างควรมีรูปทรงทางเรขาคณิต เพราะความยาว และพื้นที่หน้าตัดจะนำมาใช้คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

2. การรั่วไหลของกระแส

การรั่วไหลอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบ และบริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจจะเกิดจากความผิดปกติทางฟลิกภายในอีกด้วย

3. อุณหภูมิ

- สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะ ทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะมีผลกระทบน้อยกว่าฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีผลควรทำการวัดหลาย ๆ จุด และจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งส่งผลกระทบไปถึงปรากฏการณ์ภายในของสารตัวอย่าง
- ระยะเวลาห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะสั้นๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสัมผัสขั้วสม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่ และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไขด้วยวิธีตรึงที่ขั้วหนึ่ง และอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตรฐานบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.15 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

4. แสง

ขณะทำการวัดควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้น ให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้น ได้ส่งผลให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกัน แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สารตัวอย่าง ทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

5. ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้จะหลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อย สำหรับสารตัวอย่างจำพวก โลหะแต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นจึงพยายามวัดในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

6. ผิดสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

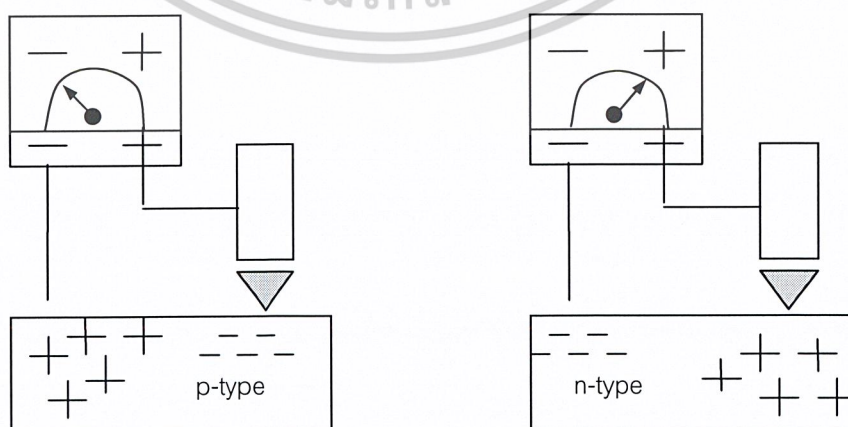
ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้น กับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักจะมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณข้อสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสทำให้เกิดข้อผิดพลาดการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบ และเลือกชนิดของโลหะที่ใช้มาเป็นข้อสัมผัสเสียก่อนค่าที่จะเป็นที่ยอมรับ การทดสอบความต้านทานข้อสัมผัสมักจะพิจารณา ค่าความต้านทานจำเพาะผิวดังนี้

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้ บางอย่างอาจหลีกเลี่ยงได้ บางอย่างก็อาจหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของสารตัวอย่างจากหลักโดยทั่วไปแล้วควรจะวัดหลาย ๆ ครั้ง ที่เงื่อนไขเดียวกัน และวัดหลาย ๆ วิธี เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนและเชื่อถือได้ และในการแสดงค่าความต้านทานของสารตัวอย่างมักจะบอกคู่ไปกับค่าที่วัดได้ว่าวัดด้วยวิธีใด

2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้วิธีขั้วความร้อน

[Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; จิตินัย, 2546]

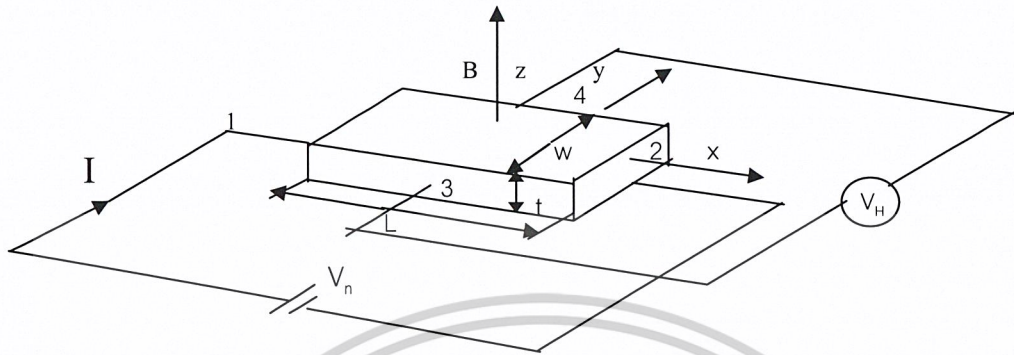
วิธีขั้วความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการตรวจสอบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือ จี้อหัวแรงขับเคลื่อนไปตรงบริเวณที่ปรากฏเป็นรอยค่างของผิวหน้าฟิล์มบางรอยค่างนี้เกิดจากบริเวณที่กระเจกเสียบเข้ากับแท่งเทพลอน ดังนั้นฟิล์มจึงเคลื่อนไม่ติด โยงสายไฟจากหัวแรงเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกฟิล์มบางนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็มโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบ ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ [Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; อารีย์, 2543]



รูปที่ 2.17 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์

สำหรับโลหะ หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ p พาหะตัวนำจะมีเพียงชนิดเดียว (อิเล็กตรอน หรือ โฮล) ถ้าพาหะตัวนำมีประจุ q และสภาพเคลื่อนที่ได้ μ โดยอาศัยรูปที่ 2.17 เราพบว่า พาหะตัวนำดังกล่าวจะถูกแรงกระทำ จากทั้งสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{B} (ในทิศทาง $+z$) โดยอาศัยนิยามสภาพเคลื่อนที่ได้ เมื่อคิดถึงผลของสนามแม่เหล็กร่วมด้วย เราสามารถเขียนความเร็วลอยเลื่อนได้เป็น

$$\vec{v} = \pm\mu(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.28)$$

โดยที่เครื่องหมายบวก ใช้สำหรับ โฮล และเครื่องหมายลบ ใช้กับอิเล็กตรอน

สำหรับในพิกัดฉาก xyz เราสามารถเขียน $\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$

โดยที่

$$v_x = \pm\mu(E_x + v_y B_z) \quad (2.29)$$

$$v_y = \pm\mu(E_y + v_x B_z) \quad (2.30)$$

$$v_z = \pm\mu E_z \quad (\because B_x = B_y = 0) \quad (2.31)$$

เนื่องจาก ความหนาแน่นกระแส $\vec{J} = nq\vec{v}$ ดังนั้น ความหนาแน่นกระแส ในแต่ละแกนพิกัด (component) เขียนได้เป็น

$$J_x = \pm\mu(nqE_x + J_y B_z) \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_y = \pm \mu (nqE_y + J_x B_z) \quad (2.33)$$

$$J_z = \pm \mu nqE_z \quad (2.34)$$

ถ้าจ่ายกระแสให้กับวัสดุตัวนำ ตามรูปที่ 2.17 โดยต่อขั้วของแหล่งจ่ายไฟคร่อมด้าน 1 และ 2 จะทำให้กระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำดังกล่าวในทิศทาง $+x$ ดังนั้น current density ในแนว y และ z จึงเป็นศูนย์ กล่าวคือ $J_y = J_z = 0$ ดังนั้น

$$E_y = \frac{J_x B_z}{nq} \quad (\text{V/m}) \quad (2.35)$$

สมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่าเกิดสนามไฟฟ้าในแนว y คร่อม ด้าน 3 และ 4 ขึ้นโดยสนามไฟฟ้า E_y นี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะ โดยขนาดของแรงเท่ากับ แรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก B_z แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน เพื่อที่จะให้เห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลองพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.17 โดยผ่านกระแสดังรูป อิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงกระทำเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น $F_{By} = -qV_x B_z$ ทำให้ด้าน 4 ของสารกึ่งตัวนำมีประจุบวก และด้าน 3 มีประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage : V_H) และมีสนามไฟฟ้า E ในทิศทาง $-y$ สนามนี้ทำให้เกิดแรงกระทำขนาด qE ในทิศ $+y$ ($F_E = qE_y$) หักล้างแรงจากสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ

$$F_y + F_{-y} = 0 \quad (2.36)$$

$$qE_y - qv_x B_z = 0$$

$$\therefore E_y = \frac{qv_x B_z}{q} = \frac{nq v_x B_z}{nq} = \frac{J_x B_z}{nq}$$

กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient : R_H) เขียนได้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อความสะดวกในการหาค่า R_H เราจึงจำเป็นต้องเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าที่วัดได้จากการทดลอง V_H, t (ความหนาของวัสดุที่นำมาศึกษา), I และ B_z

$$\text{เนื่องจาก } V_H = V_3 - V_4 = WE_y \text{ (เมื่อ } W \text{ คือความกว้างของวัสดุที่นำมาศึกษา) และ } J_x = \frac{1}{Wt}$$

(ตามนิยามของค่าความหนาแน่นกระแสในแนวแกน x)

$$\therefore R_H = \frac{V_H t}{IB_z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.35) และ (2.36) เราพบว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สัมพันธ์กับความหนาของพาหะตัวนำ (n) ดังนี้

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.39)$$

ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าความหนาแน่นของพาหะประจุของพาหะ รวมถึงสภาพคล่องของพาหะ (Hall mobility : μ_H) ตามสมการ

$$\mu_H = |R_H| \sigma \quad (m^2 (V.s)^{-1}) \quad (2.40)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า

สำหรับในกรณีที่วัสดุตัวนำมีพาหะตัวนำทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ได้ดังนี้

เราสามารถเขียนความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน และ โฮล ในแนวแกน y ได้เป็น

$$J_y = n_h e v_{hy} - n_e e v_{ey} \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.41)$$

เมื่อ V_{hy} และ V_{ey} คือ ความเร็วลอยเลื่อนของโฮลและอิเล็กตรอนในแนวแกน y โดยอาศัยสมการที่ (2.29), (2.30) เราสามารถเขียน J_y ได้ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ (2.30)} \quad v_y = \pm \mu (E_y - v_x B_z)$$

$$\therefore J_y = n_h e \mu_h (E_y - v_x B_z) + n_e e \mu_e (E_y - v_x B_z)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_y = (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h V_x B_z - n_e e \mu_e V_x B_z$$

จากสมการที่ (2.29) $V_x = \pm \mu (E_x - V_y B_z)$

$$\begin{aligned} \therefore J_y &= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h B_z (\mu_h) (E_x + V_{yh} B_z) + n_e e \mu_e B_z (\mu_e) (E_x + V_{ye} B_z) \\ &= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h^2 B_z E_x - n_h e \mu_h^2 B_z^2 V_{yh} + n_e e \mu_e^2 B_z E_x + n_e e \mu_e^2 B_z^2 V_{ye} \end{aligned}$$

(กำหนดให้ ขนาดของ B มีค่าน้อย ๆ จะทำให้เทอมที่ 3 และ 5 เป็น (0))

$$\therefore J_y = (n_h \mu_e + n_e \omega_e) e E_y - (n_e \mu_h^2) e B_z E_x \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.42)$$

จากนั้นเราสามารถพิจารณาเงื่อนไข $J_y = 0$ (เพราะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างด้าน 3 และ 4 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าหักล้างกับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก และทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)

โดยอาศัยนิยามของ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z}$$

โดย σ หาได้จากสมการ

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_h e \mu_h \quad (\Omega \cdot m)^{-1}$$

และ $\frac{E_y}{E_x E_z}$ หาได้จากสมการที่ (2.41) เมื่อ $J_y = 0$

$$\text{โดยที่ } \frac{E_y}{E_x E_z} = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{(n_e \mu_e + n_h \mu_h)}$$

$$\therefore R_H = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z} = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{e (n_e \mu_e + n_h \mu_h)} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 1.7 MHz ช่วยทำให้สารละลายกลายเป็นไอบริสุทธิ์ พร้อมทั้งทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบางของ SnO_2 เจือด้วยอะตอมของ Sb ที่ความเข้มข้นต่างๆ รวมทั้งศึกษาระยะเวลาในการพ่นสารละลายว่า มีผลอย่างไรกับฟิล์มบางดิบๆ ออกไซด์ที่เจือด้วยแอนติโมนี ($\text{SnO}_2 : \text{Sb}$) การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้น จะศึกษา ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยวิธีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยทำการตรวจสอบชนิดของการนำไฟฟ้า การวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และความหนาแน่นพาหะรวมทั้งสภาพคล่องของพาหะจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

3.1 วิธีการทดลอง

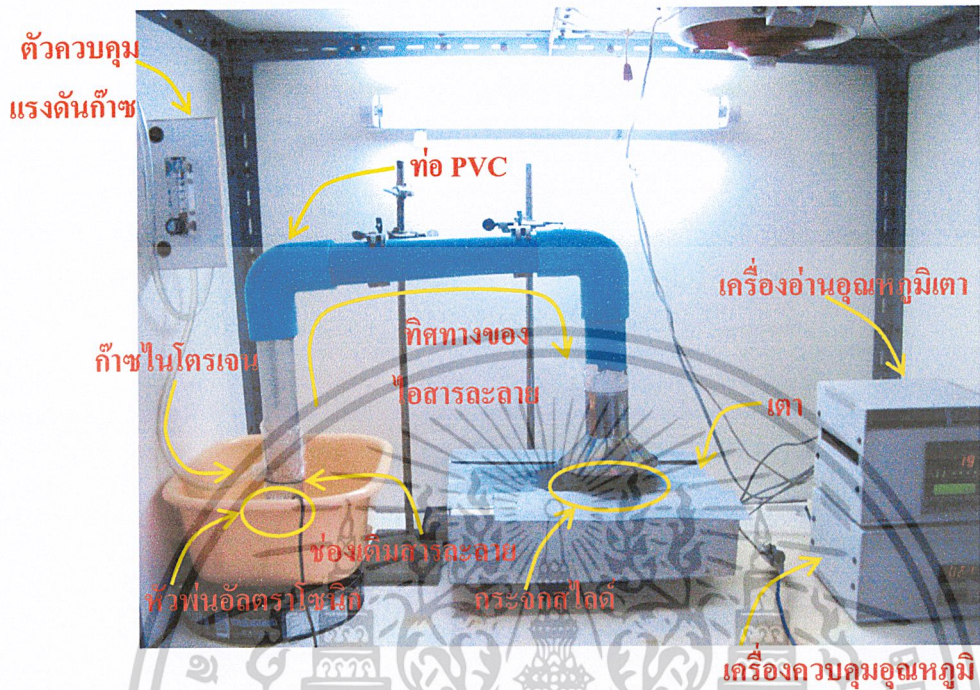
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2

[Shanthi, 1999; Okuya, 2004; งามนิตย์, 2547]

อุปกรณ์หลักคือ หัวอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 1.7 MHz เตาให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ และสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ถึง 6000 W กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นรองรับฟิล์มบางเทอร์โมคัปเปิล อ่างน้ำเพื่อใช้เป็นตัวกลาง ในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกไปสู่สารตั้งต้น แผ่นพลาสติกใส ท่อน้ำ เพื่อใช้เป็นเส้นทางลำเลียงไอของสารตั้งต้น ไปสู่แผ่นรองรับ และสารตั้งต้นต่าง ๆ ประกอบด้วย ทินเตตระคลอไรด์ ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), เมทานอล (CH_3OH), กรดไฮโดรคลอริก (HCl), แอนติโมนีคลอไรด์ (SbCl_3) โดยสารละลายทั้งหมด ที่จะใช้พ่นในแต่ละครั้ง เป็น 60 ml โดย

- ความเข้มข้นของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.02 M
- ความเข้มข้นของ HCl 37% 4 M (HCl 33.3 ml และน้ำ DI 67 ml)
- ความเข้มข้นของสารเจือ Sb ($\text{SbCl}_3 / \text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ เป็น 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, 4.0% โดยน้ำหนักของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส

3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์ [งามนิตย์, 2543; งามนิตย์, 2547; จูตินัย, 2546]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง SnO_2 จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 25 และ 75 mm ซึ่งทำความสะอาดดังนี้

1. นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดโดยการแช่หรือล้างด้วยน้ำยาล้างจาน
2. นำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำธรรมดา
3. นำกระจกสไลด์ไปล้างไนไตรคลอโรเอทิลีน (TCE)
4. นำกระจกสไลด์ไปสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก โดยแช่ด้วยอะซิโตน (acetone) เป็นเวลา 10 นาที
5. นำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)
6. นำกระจกสไลด์ไปสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก โดยแช่ด้วยเอทานอล (ethanol) เพื่อขจัดอะซิโตน เป็นเวลา 10 นาที
7. นำกระจกสไลด์มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI)
8. นำกระจกสไลด์ไปอบที่เตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnO₂

[งามนิติย์, 2547; Shanthi, 1999; Rajpure, 2000; Patil, 2003; Elangovan, 2003]

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาด และเตรียมกระจกสไลด์ขนาด 25 x 75 mm
2. ชั่งสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วย ทินเตตระคลอไรด์ (SnCl₄·5H₂O) ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ให้ได้ปริมาณ 4.206 g และแอนติโมนีคลอไรด์ (SbCl₃) ปริมาณ 0.013, 0.027, 0.053, 0.08 และ 0.106 g ตามลำดับ ซึ่งจะเป็อัตราส่วนระหว่าง [Sb] / [Sn] 0.5, 1.0, 2.0 3.0 และ 4.0 wt%.
3. เตรียมสารละลายโดยนำ SnCl₄·5H₂O ละลายใน HCl ความเข้มข้น 4 M ปริมาณ 15 ml แล้วเติมเมทานอลลงในบีกเกอร์ให้ ได้สารละลาย 60 ml
4. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3 ใส่ลงในที่บรรจุสารละลาย
5. นำกระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาวางบนเตาให้ความร้อน
6. ปรับเตาให้ความร้อน โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิของ Shimaden รุ่น PIDFP 21 ให้ได้ อุณหภูมิ 400°C โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล เป็นตัววัดอุณหภูมิ
7. ปรับหัวฟันทดตราโซนิค ซึ่งเป็นตัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่ 1.7 MHz จนเกิด ไอสารละลาย แล้วปล่อยให้ก๊าซในโตรเจนเพื่อพาไอไปสู่กระจกสไลด์
8. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนปริมาณของ SbCl₃ ตามปริมาณที่ชั่งไว้ตามข้อ 2
9. นำฟิล์มบาง SnO₂ ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจาก ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 6400 โดยใช้ แรงดัน 13 kV
10. นำฟิล์มบาง SnO₂ ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วย วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาว คลื่น 1.5406 Å โดยใช้กระแส 40 mA และแรงดัน 40 kV
11. นำฟิล์มบาง SnO₂ ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาสมบัติทางแสง โดยการวัดค่าการส่งผ่าน แสงในช่วงความยาวคลื่น 300 - 2500 nm ด้วยเครื่องยูวี – วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปก โตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101 PC ชนิด สองลำแสง (double beam)
12. นำฟิล์มบาง SnO₂ ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และด้วยการศึกษาจากปรากฏการณ์ของฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 เจือด้วย Sb ที่ความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ได้ดี มีสีขาวใสจนถึงสีน้ำเงินอ่อน ๆ จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1

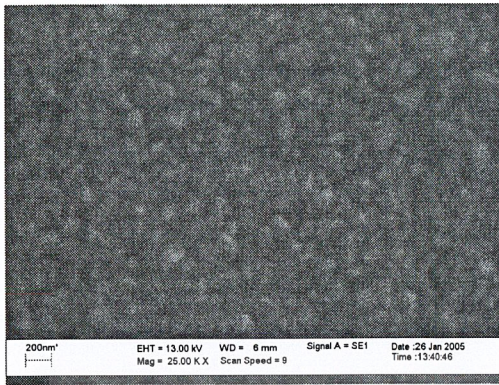


รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส

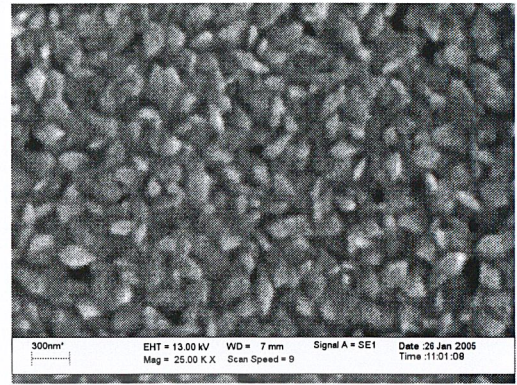
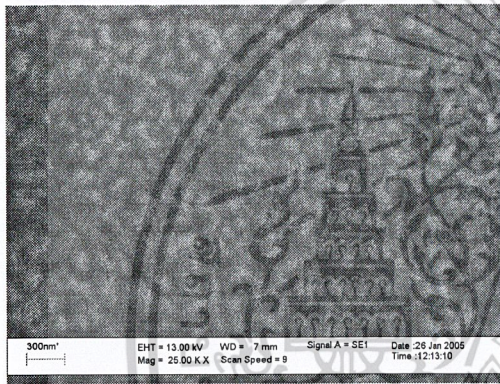
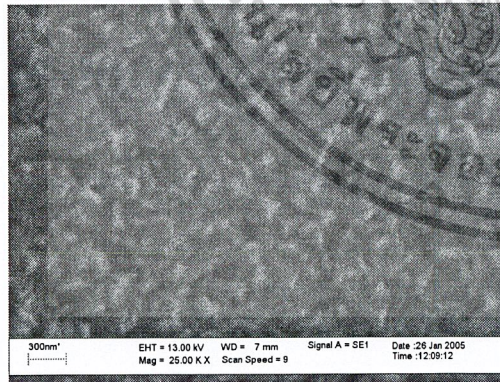
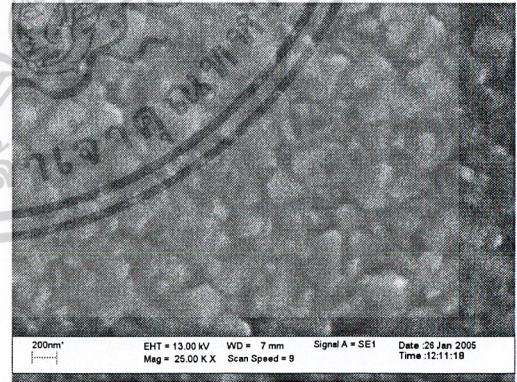
4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษากายภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย Sb ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส ที่ความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เท่ากัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และพบว่าเกรนของเนื้อฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% มีขนาดสม่ำเสมอ โดยมีขนาดประมาณ 150 nm ซึ่งการใช้เวลาในการพ่นต่างกัน ทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาแตกต่างกันคือ 547 nm ถึง 1.5 μm อย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

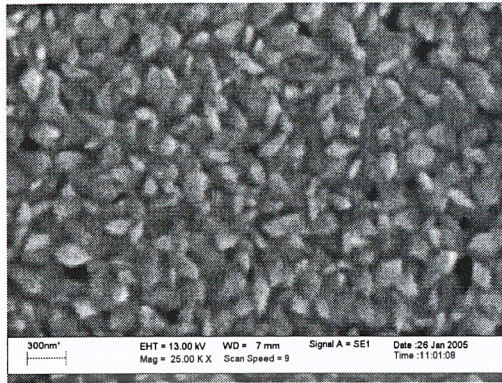


Undoped

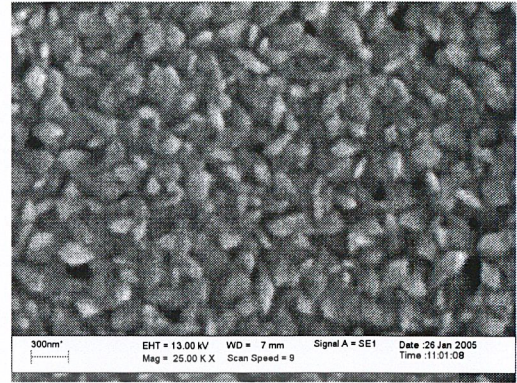
 $[Sb] / [Sn] = 0.5\%$  $[Sb] / [Sn] = 1.0\%$  $[Sb] / [Sn] = 2.0\%$  $[Sb] / [Sn] = 3.0\%$  $[Sb] / [Sn] = 4.0\%$

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[Sb] / [Sn]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส

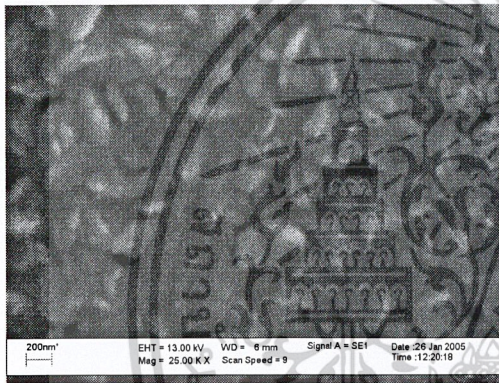
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



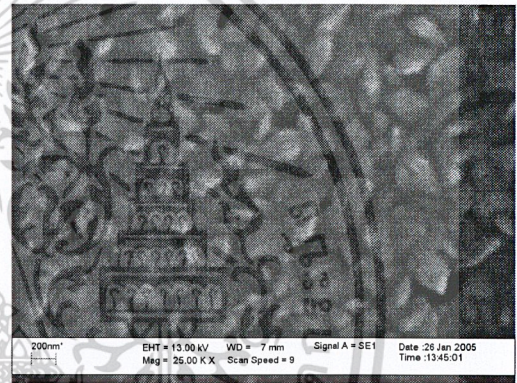
t = 15 min.



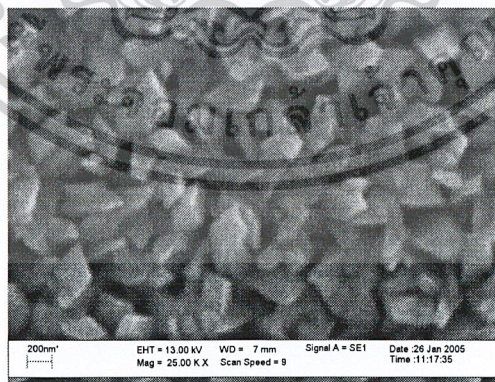
t = 20 min.



t = 30 min.

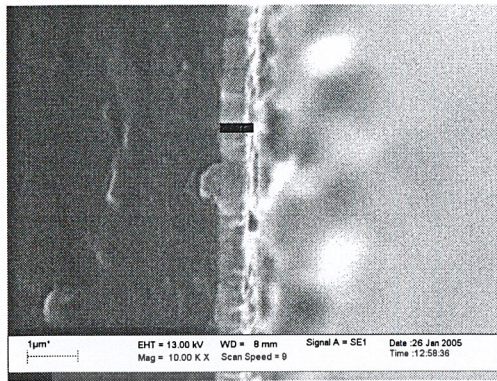


t = 40 min.

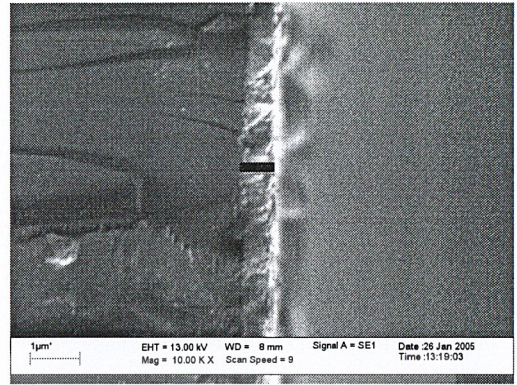


t = 50 min.

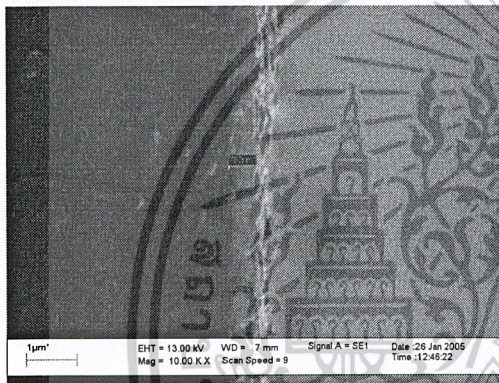
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนัล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาเบเซประยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



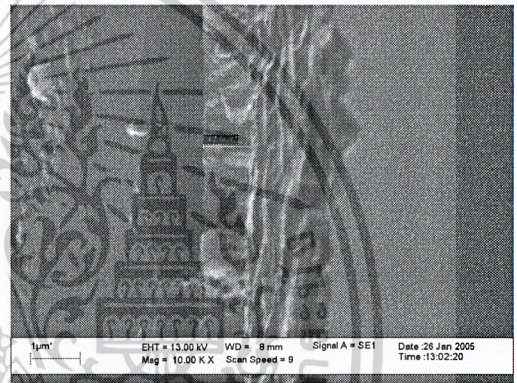
t = 15 min.



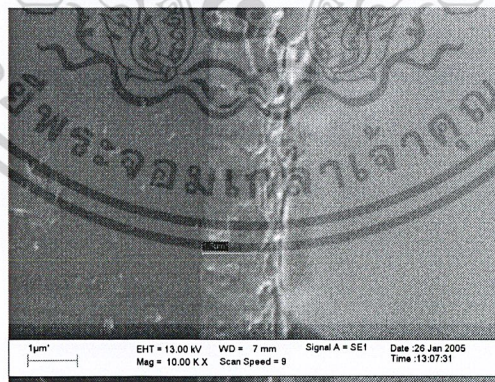
t = 20 min.



t = 30 min.



t = 40 min.



t = 50 min.

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาคตัดขวางของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด พิจารณารูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้น $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เท่ากัน และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน ปรากฏว่าฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ที่เตรียมด้วยวิธีสเปร์ย์ไพโรไลซิสมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนัล รูไทล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว และมีระนาบที่เด่นชัดคือ ระนาบ (200) โดยเมื่อมีการเจือความเข้มข้น $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ มากขึ้นจะทำให้ระนาบ (200) มีความคมชัดมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเจือความเข้มข้น $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกรนของฟิล์มบางมีการจัดตัวในแนวระนาบ (200) มากขึ้น โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 และ 4.7 นอกจากนี้ยังพบว่าเกรนมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นขนาดของเกรนที่คำนวณจากกราฟ XRD ตามสมการที่ (4.1) [Cullity, 1956; Kittel, 1974; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

ขนาดของเกรน (grain size)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (4.1)$$

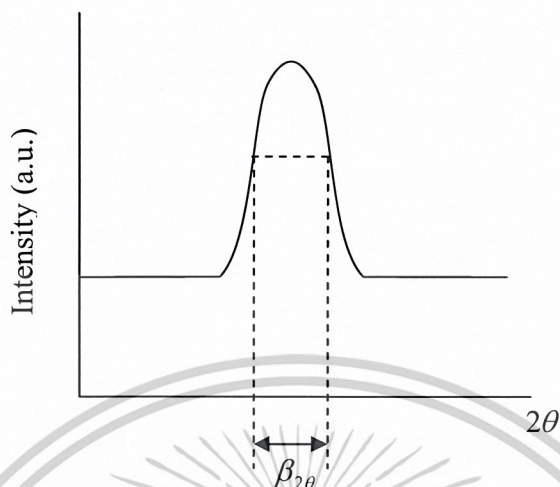
เมื่อ	D	คือ ขนาดเกรน
	K	คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
	$\beta_{2\theta}$	คือ ระยะเวลาความกว้างของฟิสิกที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half – maximum of the diffraction peak)

ความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain)

$$\varepsilon = \beta_{2\theta} \cos \theta / 4 \quad (4.2)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

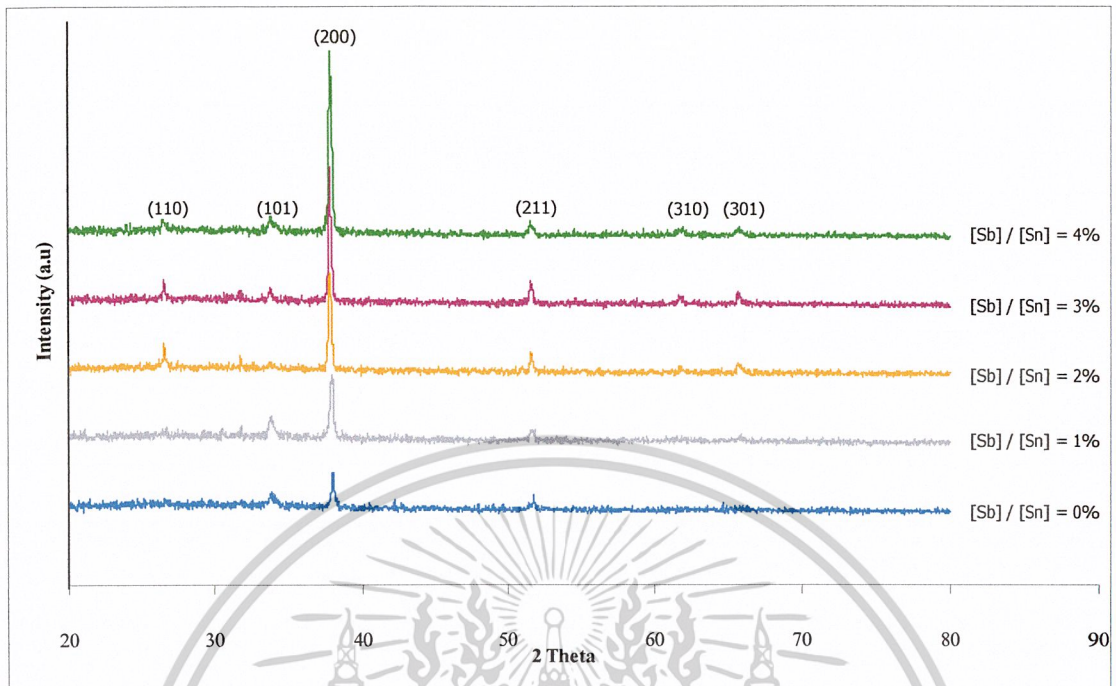


รูปที่ 4.5 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

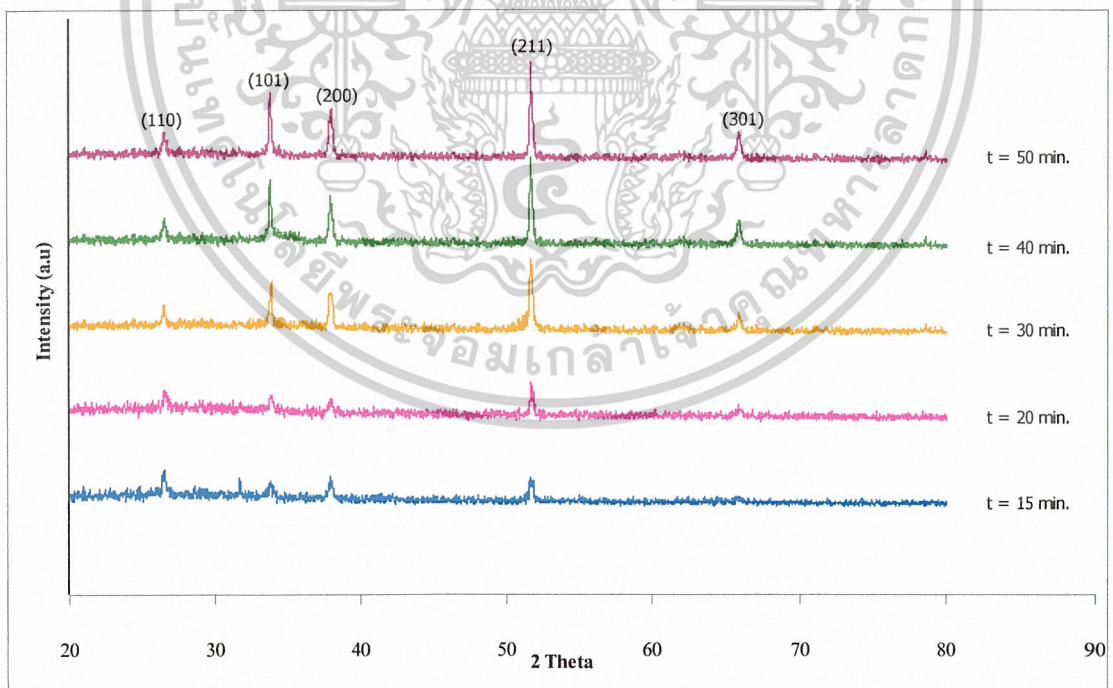
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนจากที่คำนวณได้จากกราฟ XRD และจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีก

สารตัวอย่าง	ขนาดเกรนที่คำนวณได้จาก FWHM (10^{-9} เมตร)	ขนาดเกรนที่ได้จากภาพถ่าย SEM (10^{-9} เมตร)
SnO_2	78	125
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ([Sb/Sn]=0.5%)	114	150
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ([Sb/Sn]=1.0%)	62	175
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ([Sb/Sn]=2.0%)	73	200
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ([Sb/Sn]=3.0%)	74	250
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ ([Sb/Sn]=4.0%)	75	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีกัล



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของ โคร่งผลึกของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

[Sb] / [Sn] (wt%)	ค่าคงที่ของโคร่งผลึก ($\overset{\circ}{A}$)	
	a	c
0.0	4.731	3.205
0.5	4.743	3.195
1.0	4.744	3.197
2.0	4.751	3.215
3.0	4.752	3.216
4.0	4.752	3.216

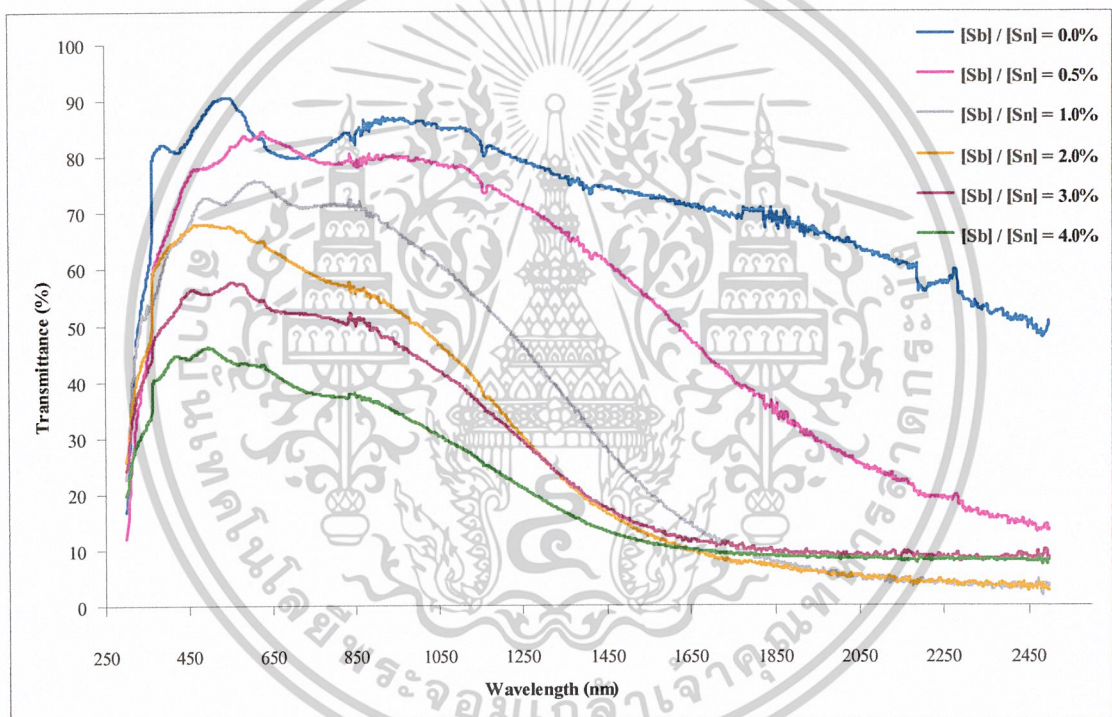
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของโคร่งผลึกของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

เวลา (นาที)	ค่าคงที่ของโคร่งผลึก ($\overset{\circ}{A}$)	
	a	c
20	4.743	3.195
30	4.753	3.196
40	4.753	3.197
50	4.755	3.200

4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสง

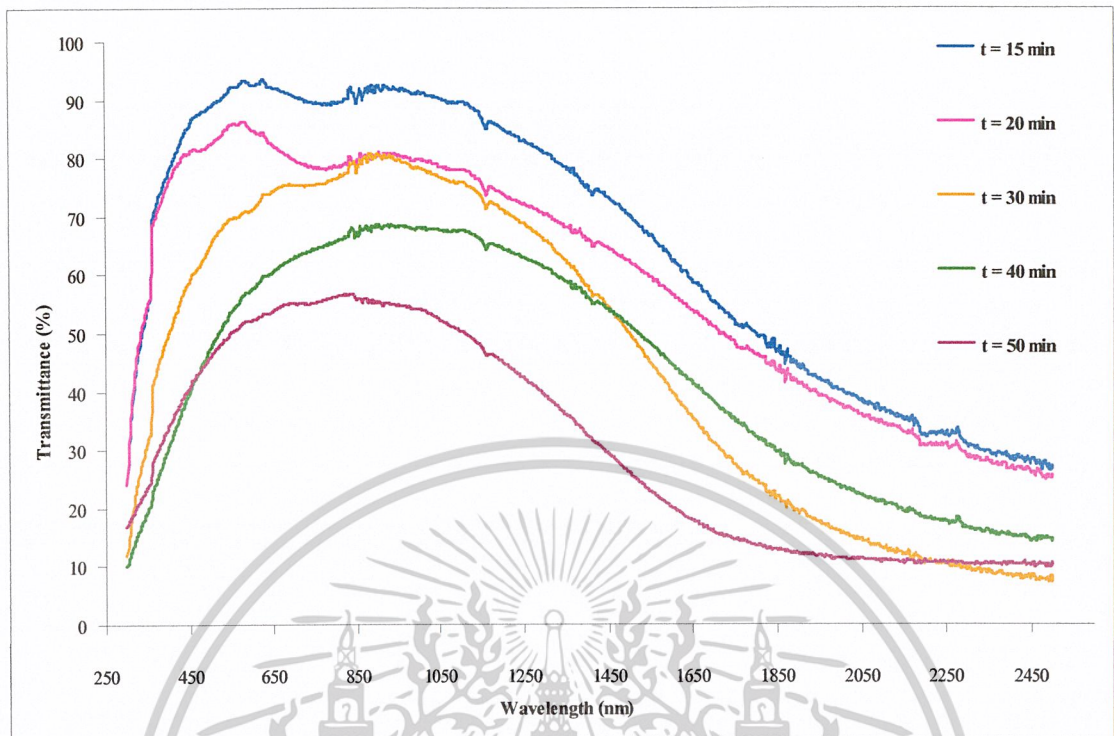
การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เท่ากัน และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี - วิสทิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101 PC โดยเลือกความยาวคลื่นในช่วง 300 – 2500 nm พบว่าฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของ [Sb] / [Sn] ต่าง ๆ นั้น แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 350 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านได้ และพบว่าฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% มีการส่งผ่านแสงได้สูงสุด และฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 4.0% มีการส่งผ่านแสงได้ต่ำสุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8 และพบว่าฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ นั้น แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 350 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านได้ และพบว่าฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] ที่เวลาในการพ่น 20 นาที มีการส่งผ่านแสงได้สูงสุด และฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] ที่เวลาในการพ่น 50 นาที มีการส่งผ่านแสงได้ต่ำสุดซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2500 nm ของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



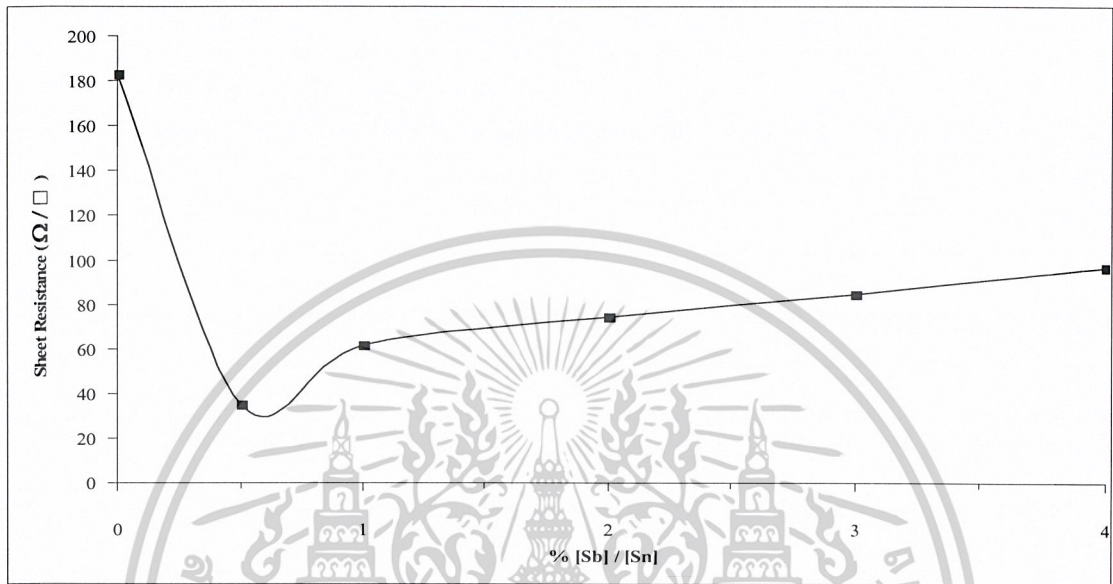
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 2500 nm ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% ที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนลิต

4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทาน

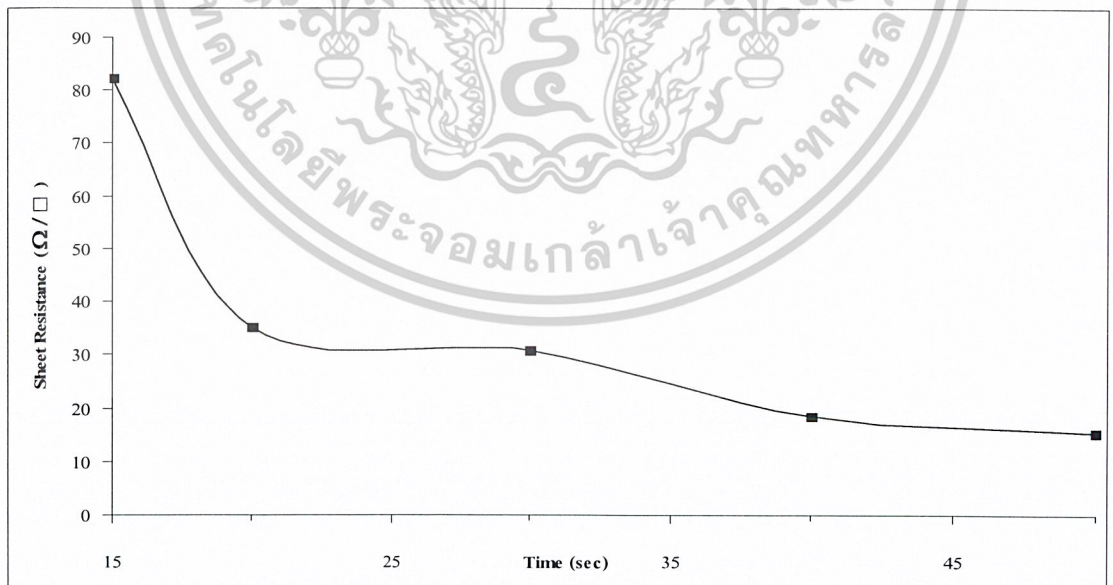
จากผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยวิธีแวน เดอร์ เพาว์ (van der Pauw method) พบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาทีเท่ากัน มีความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดคือ $35.2 (\Omega/\square)$ และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$ และพบว่าฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน มีค่าความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดคือ $15.6 (\Omega/\square)$ และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$ ซึ่งฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที จะมีค่าความต้านทานแผ่นคือ $35.2 (\Omega/\square)$ และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$ และที่ความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยเวลาที่ใช้ในการพ่น 50 นาที มีค่าความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดคือ $15.6 (\Omega/\square)$ และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$ หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือมากกว่า 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เท่ากัน พบว่าค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นของสารเจือเท่ากันคือ 0.5% แต่เวลาที่ใช้ในการพ่นน้อยกว่า 50 นาที พบว่าค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 - 4.13 และตารางที่ 4.4 - 4.5

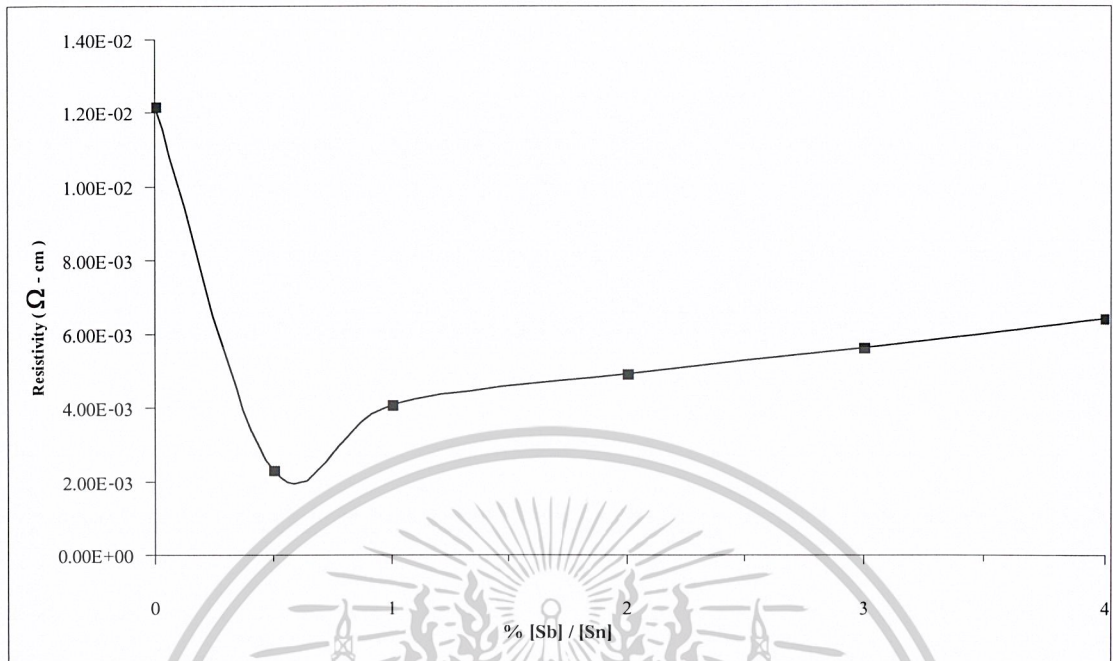


รูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส

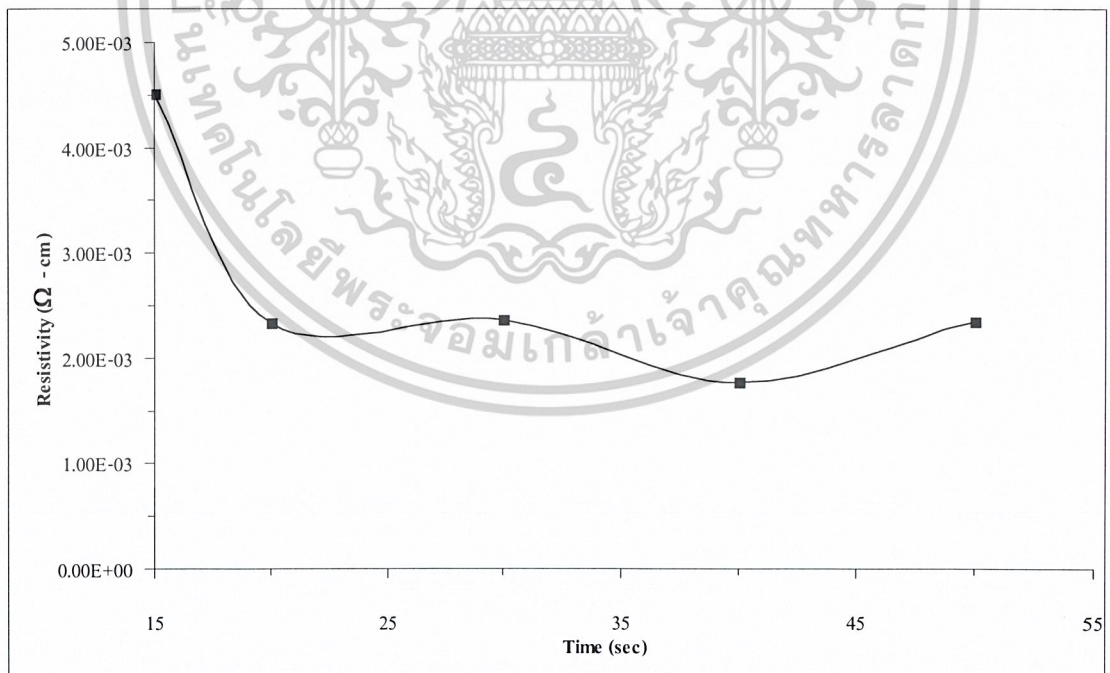


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มี

การแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

% [Sb] / [Sn] ต่าง ๆ ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที	ค่าความต้านทานแผ่น (Ω / \square)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega - \text{cm}$)
0.0	183.1	1.2×10^{-2}
0.5	35.3	2.3×10^{-3}
1.0	61.9	4.1×10^{-3}
2.0	74.4	4.9×10^{-3}
3.0	84.9	5.6×10^{-3}
4.0	97.0	6.4×10^{-3}

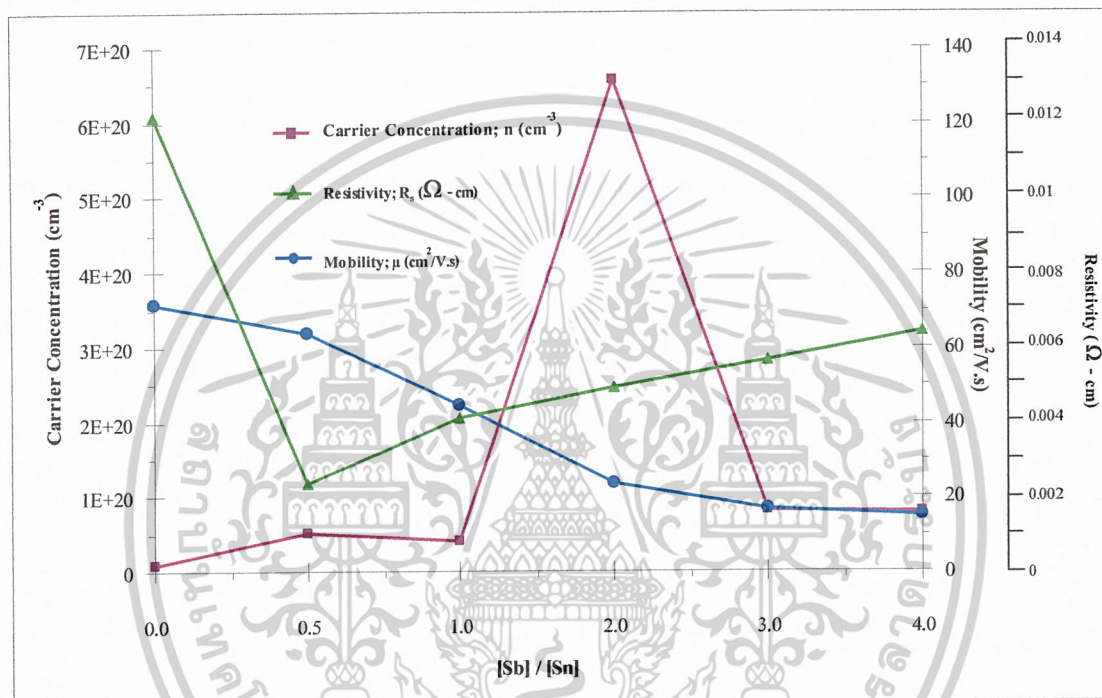
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่น และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

% [Sb] / [Sn] = 0.5 ใช้เวลาในการพ่นต่างกัน (นาที)	ค่าความต้านทานแผ่น (Ω / \square)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega - \text{cm}$)
15	82.5	4.5×10^{-3}
20	35.3	2.3×10^{-3}
30	30.9	2.4×10^{-3}
40	18.7	1.8×10^{-3}
50	15.7	2.4×10^{-3}

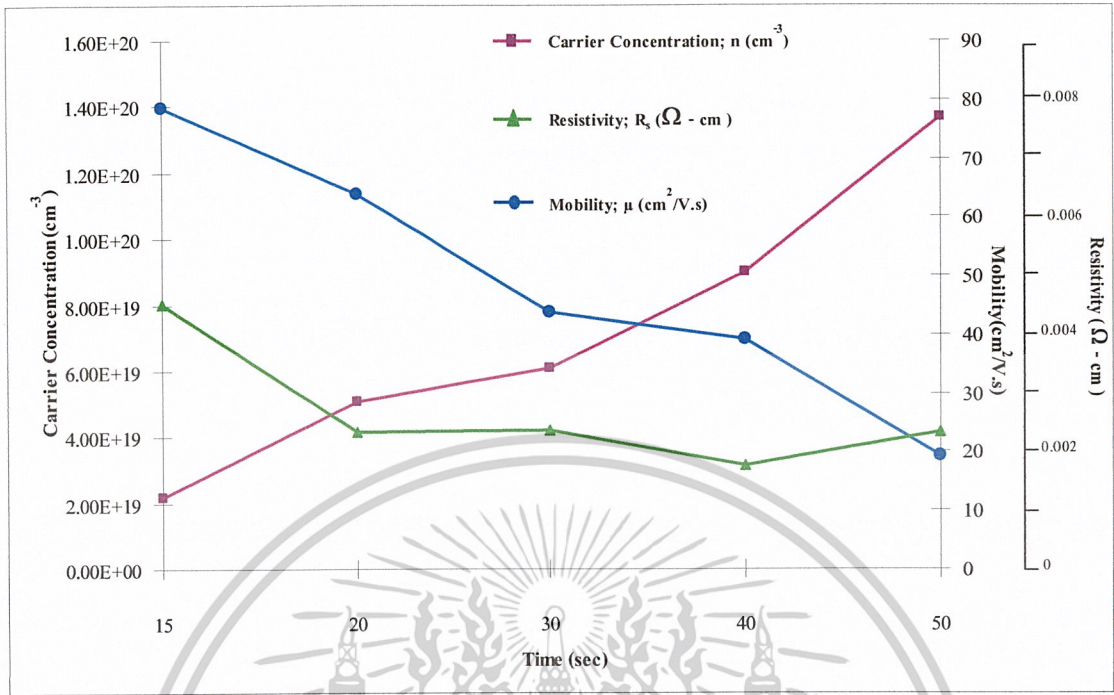
4.6 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

จากการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์สามารถหาความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะได้ โดยพบว่าฟิล์มบาง SnO₂ ที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นของพาหะ $8.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และเมื่อเจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5%, 1.0%, 2.0% ค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อเจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 3.0% และ 4.0% โดยที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาที่ เท่ากัน ส่วนสภาพคล่องของพาหะเมื่อความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นค่าสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าลดลงซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.6 เมื่อฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือด้วยความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่นต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการพ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีก

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] 0.0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0% โดยใช้เวลาในการพ่น 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีก

% [Sb] / [Sn] ต่าง ๆ ที่ใช้เวลาในการพ่น 20 นาที	ค่าความหนาแน่นของพาหะ n (cm ⁻³)	สภาพคล่องของพาหะ μ (cm ² /V.s)	สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ (Ω-cm)
0.0	8.7 x 10 ¹⁸	71.6	1.2 x 10 ⁻²
0.5	5.1 x 10 ¹⁹	63.9	2.3 x 10 ⁻³
1.0	4.2 x 10 ¹⁹	44.4	4.1 x 10 ⁻³
2.0	6.6 x 10 ²⁰	23.4	4.9 x 10 ⁻³
3.0	8.1 x 10 ¹⁹	16.6	5.6 x 10 ⁻³
4.0	7.9 x 10 ¹⁹	14.9	6.4 x 10 ⁻³

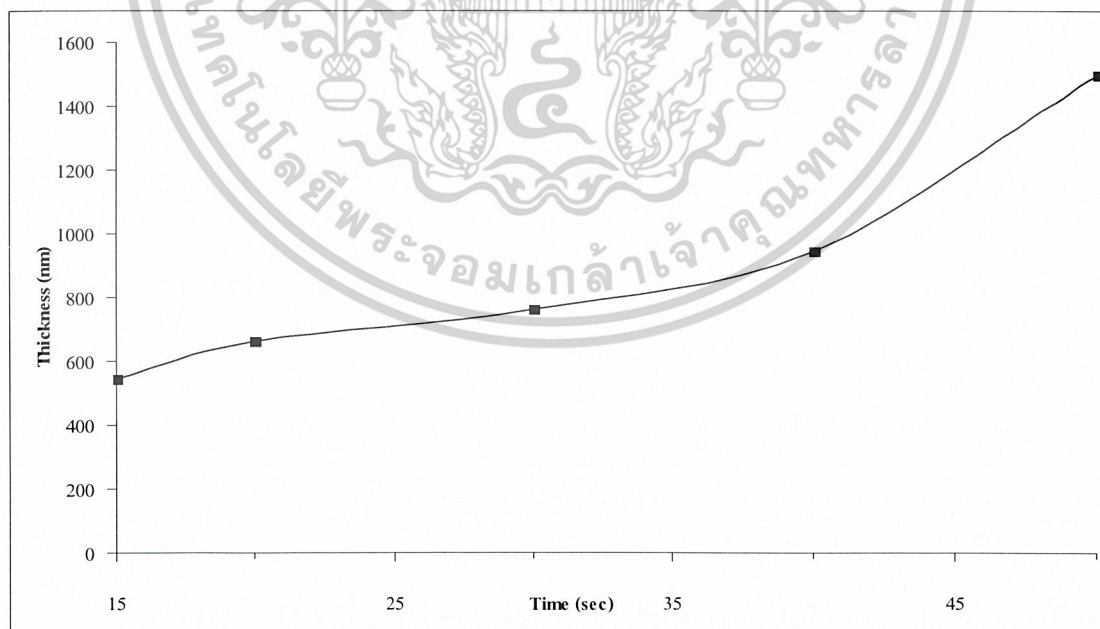
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

% $[\text{Sb}] / [\text{Sn}] = 0.5$ เวลาที่ใช้พ่นต่างกัน (นาที)	ค่าความหนาแน่น ของพาหะ n (cm^{-3})	สภาพคล่องของพาหะ μ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ($\Omega\text{-cm}$)
15	2.2×10^{19}	78.7	4.5×10^{-3}
20	5.1×10^{19}	63.9	2.3×10^{-3}
30	6.1×10^{19}	43.7	2.4×10^{-3}
40	9.0×10^{19}	39.2	1.8×10^{-3}
50	1.4×10^{20}	19.4	2.4×10^{-3}

4.7 ผลการศึกษาระหว่างค่าความหนาแน่นกับเวลา

จากการศึกษาฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย Sb ที่เตรียมได้ ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยเวลาที่ใช้ในการพ่นต่าง ๆ กัน กับค่าความหนาแน่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ พบว่าจะมีลักษณะดังรูปกราฟที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงค่าความหนาแน่นของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% โดยที่ใช้เวลาในการพ่น 15 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 40 นาที และ 50 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียม โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส นั้นลักษณะของฟิล์มที่ได้ยึดเกาะกับฐานรองได้ดี จากการศึกษาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าโครงสร้างของฟิล์มที่เตรียมได้ จะเป็นแบบเตตระโกนัล รูไทล์ และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และยังพบว่าเกรนมีขนาดลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้น โดยพบว่าเกรนมีขนาดอยู่ในช่วง 150 nm เมื่อเจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ (0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0% และ 4.0%) จะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง โดยที่ 0.5% มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$ เนื่องจากการเจืออะตอมของ Sb จะเข้าไปแทนที่อะตอมของดีบุกทำให้อิเล็กตรอนเกินมา 1 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนตัวนี้ จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนเมื่อเจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 4.0% ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น และเมื่อนำฟิล์มบาง SnO_2 ไปทำการศึกษากการส่งผ่านแสงพบว่า ฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% สามารถส่งผ่านแสงได้มากที่สุด และจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์ พบว่า ปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ ในปริมาณมากขึ้น อยู่ในช่วง 10^{18} - 10^{20} cm^{-3} และสภาพคล่องของพาหะลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาทั้งหมดสรุปได้ว่า ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือความเข้มข้นของ $[\text{Sb}] / [\text{Sn}]$ 0.5% มีการส่งผ่านแสงได้มากที่สุด และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $2.3 \times 10^{-3} (\Omega\text{-cm})$

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจอความเข้มข้นของ [Sb] / [Sn] โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบปัญหา และเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

1. คุณภาพของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับอัตราการพ่นของสารละลายโดยหากใช้อัตราการพ่นเร็วเกินไปจะทำให้เนื้อฟิล์มไม่สม่ำเสมอ
2. ในการเตรียมสารละลายตั้งต้น หากทิ้งไว้เป็นเวลานานจะทำให้เกิดการตกตะกอนได้
3. อุณหภูมิของขดลวดที่ให้ความร้อนในเตา (heater) ในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสนี้หากใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มดีขึ้น (ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส)
4. ควรมีการนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทำการเอเลนิลเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของผลึกของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2543, การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Kittel, C., 1971, **Introduction to Solid State Physics**, 4th ed., New York : John Wiley & Sons Inc. : pp. 4 – 32, 46 – 48, 56 – 60, 269 – 277, 364 – 365, 540 – 552, 611 – 612.
- Contreras, M.A., Egas, B., Ramanathan, K., Hiltner, J., Swartzlande, A., Hasoon, F. and Norfi, R., 1999, **Prog. Photovoltaics** 7 (4) : 311 - 313.
- Shanthi, S., Subramanian, C., Ramasamy, D., 1999, Growth and characterization of antimony doped tin oxide thin films, **Journal of Crystal Growth** 197 :858 – 864.
- Rajpure, K.Y., Kusumade, M.N., Neumann-Spallart, Michael N., Bhosale, C.H., 2000, Effect of Sb doping on properties of conductive spray deposited SnO_2 thin films, **Materials Chemistry and Physics** 64 : 184 – 188.
- Patil, P.S., Kawar, R.K., Seth, T., Amalnerkar, D.P., Chigare, P.S., 2003, Effect of substrate temperature on structural, electrical and optical properties of sprayed tin oxide (SnO_2) thin films, **Ceramics International** 29 : 725 – 734.
- บุญประเสริฐ เงินแท่ง, 2546, การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง, โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง และอุบลัมภ์ นาครักษ์, 2547, การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $SnO_2 : F$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองแบบไม่ต่อเนื่อง, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, 19 – 21 ตุลาคม 2547 ณ ศูนย์แสดงสินค้าและประชุมอิมแพ็ค เมืองทองธานี นนทบุรี.
- Fantini, M. and Torriani, J., 1986, The compositional and structural properties of sprayed $SnO_2 : F$ thin films, **Thin Solid Films** 138 : 255 – 265.
- จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2546, การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิรุพห์ มังกละวิรัช และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2543, **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**, วารสารเครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, พฤษภาคม, หน้า 129 – 165.
- Cullity, B.D., 1956, **Elements of X – rays Diffraction.**, Addison – Wesley Publishing Company Inc. : pp 9 – 14.
- สิงหนเดช แต่งจวง, 2539, **การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิค การเคลือบแบบอบสารละลายเคมี**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abelas, F., 1972, **Optical Properties of Solids**, London, North – Holland, pp. 23 – 40.
- Runyun, W.R., 1975, **Semiconductor Measurement and Instrumentation**, New York, Mc Graw – Hill, Bombay, pp.67 – 91.
- อารีย์ วิเชียรฉาย, 2543, **เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ**, เอกสารประกอบการเรียน, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Elangovan, E., Ramesh, K., Ramamurthi, K., 2004, Studies on the structural and electrical properties of spray deposited SnO₂:Sb thin films as a function of substrate temperature, **Solid State Communications 130 : 523 – 527.**
- Masayuki Okuya, Koji Nakade, Daisuke Osa, Takafumi Nakano, Asoka Kumara, G.R., Shoji Kaneko., 2004, Fabrication of dye-sensitized solar cells by spray pyrolysis deposition (SPD) technique, **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 164 : 167 – 172.**
- Elangovan, E., Ramesh, K., Ramamurthi, K., 2003, Studies on optical properties of polycrystalline SnO₂:Sb thin films prepared using SnCl₂ precursor, **Cryst. Res. Technol. 38 (9) : 779 – 784.**
- Elangovan, E., Ramesh, K., Ramamurthi, K., 2003, Optoelectronic properties of spray deposited SnO₂:F thin films for window materials in solar cells, **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 5 (1) : 45 – 54.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-451		Radiation = 1.540600					Quality: Calculated			
SnO ₂		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>				
Cassiterite, syn / Tin Oxide		26.511	100	1	1	0				
		33.770	76	1	0	1				
		37.843	21	2	0	0				
		38.858	3	1	1	1				
		42.514	1	2	1	0				
		51.613	53	2	1	1				
		54.593	12	2	2	0				
		57.628	6	0	0	2				
		61.691	11	3	1	0				
		62.404	<1	2	2	1				
		64.516	11	1	1	2				
		65.754	13	3	0	1				
		69.017	<1	3	1	1				
		71.027	5	2	0	2				
		74.185	<1	2	1	2				
		78.442	8	3	2	1				
		80.865	2	4	0	0				
		83.407	5	2	2	2				
		83.905	<1	4	1	0				
		86.927	2	3	3	0				
		89.447	6	3	1	2				
Lattice: Tetragonal		Mol.weight = 150.69								
S.G.: P42/mmm (136)		Volume[CD] = 72.15								
a = 4.75090		Dx = 6.936								
c = 3.19650		I/Icor = 9.63								
Z = 2										
ICSD COLLECTION CODE : 039177										
TEMPERATURE FACTOR : ATF										
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 930.										

Pattern : 77-452		Radiation = 1.540600					Quality: Calculated			
SnO ₂		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>				
Cassiterite, syn / Tin Oxide		26.487	100	1	1	0				
		33.740	76	1	0	1				
		37.808	21	2	0	0				
		38.823	3	1	1	1				
		42.474	1	2	1	0				
		51.564	52	2	1	1				
		54.539	12	2	2	0				
		57.574	6	0	0	2				
		61.629	10	3	1	0				
		62.342	<1	2	2	1				
		64.454	11	1	1	2				
		65.688	13	3	0	1				
		68.947	<1	3	1	1				
		70.957	5	2	0	2				
		74.110	<1	2	1	2				
		78.359	7	3	2	1				
		80.777	2	4	0	0				
		83.319	5	2	2	2				
		83.811	<1	4	1	0				
		86.829	2	3	3	0				
		89.348	6	3	1	2				
Lattice: Tetragonal		Mol.weight = 150.69								
S.G.: P42/mmm (136)		Volume[CD] = 72.34								
a = 4.75520		Dx = 6.918								
c = 3.19920		I/Icor = 9.52								
Z = 2										
ICSD COLLECTION CODE : 039178										
TEMPERATURE FACTOR : ATF										
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 1100.										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 71-652		Radiation = 1.540600					Quality: Calculated				
SnO ₂		2th	l	h	k	l					
Cassiterite / Tin Oxide		26.585	100	1	1	0					
		33.874	76	1	0	1					
		37.950	21	2	0	0					
		38.977	4	1	1	1					
		42.635	1	2	1	0					
		51.771	56	2	1	1					
		54.754	13	2	2	0					
		57.825	6	0	0	2					
		61.877	12	3	1	0					
		62.599	<1	2	2	1					
		64.737	12	1	1	2					
		65.962	15	3	0	1					
		69.283	<1	3	1	1					
		71.274	6	2	0	2					
		74.444	<1	2	1	2					
		78.703	9	3	2	1					
		81.131	3	4	0	0					
		83.709	6	2	2	2					
		84.186	<1	4	1	0					
		87.223	3	3	3	0					
		89.779	7	3	1	2					
Lattice: Tetragonal		Mol.weight = 150.69									
S.G.: P42/mnm (136)		Volume[CD] = 71.53									
a = 4.73800		Dx = 6.996									
c = 3.18650		I/Icor = 9.98									
Z = 2											
ICSD COLLECTION CODE : 009163											
TEMPERATURE FACTOR : ATF											
REMARKS FROM ICSD : REM REF.											

Pattern : 72-1147		Radiation = 1.540600					Quality: Calculated				
SnO ₂		2th	l	h	k	l					
Tin Oxide		26.591	100	1	1	0					
		33.888	74	1	0	1					
		37.959	20	2	0	0					
		38.991	3	1	1	1					
		42.645	1	2	1	0					
		51.787	50	2	1	1					
		54.767	12	2	2	0					
		57.855	6	0	0	2					
		61.892	10	3	1	0					
		62.618	<1	2	2	1					
		64.768	10	1	1	2					
		65.981	13	3	0	1					
		69.259	<1	3	1	1					
		71.306	5	2	0	2					
		74.477	<1	2	1	2					
		78.727	7	3	2	1					
		81.152	2	4	0	0					
		83.744	5	2	2	2					
		84.207	<1	4	1	0					
		87.246	2	3	3	0					
		89.817	5	3	1	2					
Lattice: Tetragonal		Mol.weight = 150.69									
S.G.: P42/mnm (136)		Volume[CD] = 71.47									
a = 4.73700		Dx = 7.002									
c = 3.18500		I/Icor = 9.62									
Z = 2											
ICSD COLLECTION CODE : 016635											
REMARKS FROM ICSD : REM REF.											
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>Pattern</i> : 16-737		<i>Radiation</i> = 1.540600					<i>Quality</i> : Not indexed				
Sn ₃ O ₄		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>					
Tin Oxide		10.820	5								
		24.099	30								
		25.879	5								
		27.081	100								
		31.727	80								
		32.316	50								
		33.015	50								
		37.073	40								
<i>Lattice</i> : Not assigned		40.248	30								
<i>Mol.weight</i> = 420.07		49.355	5								
<i>S.G.</i> : (0)		50.020	40								
		50.494	40								
		51.690	30								
		52.683	30								
		52.847	5								
		53.245	10								
		55.881	40								
		58.075	5								
		58.765	5								
		59.983	10								
		60.943	40								
		63.541	30								
		65.495	10								
		66.388	5								
		67.253	10								
		67.917	5								
		69.173	5								
		77.775	5								
		78.690	5								
		79.079	5								
		80.030	5								
		80.678	30								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารละลายตั้งต้นเพื่อเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส

มวลโมเลกุลของธาตุ

Sn	=	118.71 g / mol
Sb	=	121.75 g / mol
H	=	1.01 g / mol
O	=	16.00 g / mol
Cl	=	35.45 g / mol

การคำนวณปริมาณของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.2 โมล ในสารละลายปริมาตร 60 ml

$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 1 โมล มีน้ำหนักโมเลกุล	=	$(118.71) + (4)(35.45) + 5[2(1) + 16]$ g	
	=	350.5	g
$\therefore \text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.2 โมล	=	$(350.5)(0.2)$	g
	=	70.1	g
สารละลาย 1000 ml มี $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.2 โมล	=	70.1	g
สารละลาย 60 ml มี $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.2 โมล	=	$\frac{(70.1)(60)}{1000}$	g
	=	4.206	g

การคำนวณปริมาณของสารเจือ [Sb] / [Sn] 1 wt%

มวลโมเลกุลของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	=	350.5	g / mol
ปริมาณ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.2 โมลในสารละลาย 60 ml	=	4.206	g
$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ = 350.5 g ใน 1 โมล มี Sn	=	118.71	g
$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ = 4.206 g ใน 0.2 โมล มี Sn	=	$\frac{(118.71)(4.206)}{350.5}$	g
	=	1.4245	g
จาก $\frac{[\text{Sb}]}{[\text{Sn}]}$	=	1 wt%	
$[\text{Sb}]$	=	$\left(\frac{1}{100}\right)[\text{Sn}]_{0.2 \text{ โมล}}$	
	=	$\left(\frac{1}{100}\right)(1.4245) = 0.0142 \text{ g}$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลโมเลกุลของ $SbCl_3$	=	$(121.75)+(3)(35.45)$	g
	=	228.1	g
ปริมาณ [Sb] 121.75 g ใน 1 โมลใช้ปริมาณ $SbCl_3$	=	228.1	g
ปริมาณ [Sb] 0.0142 g ใน 1 โมลใช้ปริมาณ $SbCl_3$	=	$\frac{(228.1) \times (0.0142)}{121.75}$	g
∴ การเจือ [Sb] / [Sn] 1 wt% จะต้องใช้ $SbCl_3$ มีปริมาณ	=	0.0266	g

การเตรียมกรด HCl เข้มข้น 4 M

ในโครงการพิเศษนี้ใช้ HCl 37% ความเข้มข้น 12 M แล้วนำมาเตรียมให้ได้ความเข้มข้น 4 M ปริมาตร 100 ml ดังนี้

HCl 37%	=	12	M
ปริมาตรของ HCl 37% ความเข้มข้น 4 M	=	$\frac{(100) \times 4}{12}$	ml
	=	33.3	ml ผสมกับ
น้ำปลอดประจุ (DI Water)	=	67	ml

หมายเหตุ : ให้เติมกรด HCl ลงใน น้ำปลอดประจุ เท่านั้น ห้ามเติม น้ำปลอดประจุลงในกรด HCl

ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

1. นำ $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ ผสมกับสารเจือคือ $SbCl_3$
2. ทำการละลายสารที่ผสมแล้วในกรด HCl 4 M 15 ml
3. เมื่อสารละลายหมดแล้วให้ปรับปริมาตรให้ได้ 60 ml โดยการเติม CH_3OH
4. นำสารละลายที่ได้ไปอุ่นที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 15 นาที

ประวัติผู้เขียน

นางสาวบุญเพ็ง ราชโยธา เกิดเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนสิริรัตนาร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544

นางสาวมนัชญา มโนคติธรรม เกิดเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2526 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนสตรีศรีสุริโยทัย และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544

นางสาวศิริพร ชินสาส์น เกิดเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจาก โรงเรียนเศรษฐบุตรบำเพ็ญ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้