

การเตรียมฟิล์มบาง SnO₂ เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง



นายบุญประเสริฐ เงินแท่ง

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 51877
วัน,เดือน,ปี ๙ ส.ค. 25๖7

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Preparation of SnO_2 Thin Films for Transparent Conducting Electrode



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 Tevhnology Ladkrabang

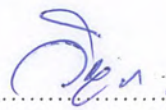
Academic Year 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การเตรียมฟิล์มบาง SnO₂ เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง
 นักศึกษา นายบุญประเสริฐ เงินแท่ง
 ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
 สาขาวิชา โพลีเมตทีเลกทรอนิกส์
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. งามนิตย์ แก้วแดง
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง
 ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

กรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร. จิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ รศ. งามนิตย์ แก้วแดง	
กรรมการ ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ	
กรรมการ อาจารย์ภารุจ บัณฑิตาวิทย์	



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง
นักศึกษา	นายบุญประเสริฐ เงินแท่ง
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา	โซลิตสเททอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2546
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) โดยเคลือบลงบนกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฟลูออรีน $[\text{NH}_4\text{F}]$ เป็น 0% ,10% ,20% ,30% และ 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งจากผลการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ และผลการศึกษานาฬิกาของเกรนจากความกว้างของพีคที่มีค่าความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (FWHM) จะอยู่ในช่วง 16-84 นาโนเมตร จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านสูงสุดที่ 80.8% สำหรับฟิล์มบางที่เจือฟลูออรีน 20% และค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.50-3.65 eV สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของฟลูออรีน และมีค่าต่ำสุด $2.59 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ของสำหรับฟิล์มบางที่เจือฟลูออรีน 30% และจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์พบว่าความหนาแน่นพาหะของฟิล์มบางมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของฟลูออรีนเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นพาหะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และค่าสภาพคล่องของพาหะมีอยู่ในช่วง $10^2 - 10^3 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of SnO ₂ Thin Films for Transparent Conducting Electrode		
Name	Mr. Booprasert Ngoenthaeng		
Department	Applied Physics		
Program	Solidstatelectronic		
Academic	2003		
Special Project Advisor	Assoc.Prof.	Ngamnit	Gaewdang
Special Project co-advisor	Assoc.Prof.Dr.	Thitinai	Gaewdang
	Asst.Prof.Dr.	Chaisingh	Poo-Rakkiat

ABSTRACT

In this special project, SnO₂ thin film doped with fluorine by spray pyrolysis have been deposited on glass substrate at 400 °C. Thin films obtained from NH₄F solutions at fluorine concentrations are 0, 10, 20, 30 and 40 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 16-84 nm. From spectrophotometer results show the best optical transmittance in the visible at 80.8% (for 20 Wt% NH₄F), and E_g in the range 3.50-3.65 eV. For electrical properties the resistivity decreases when fluorine concentration increases, and lowest resistivity is 2.59x10⁻³ Ω-cm (for 30 Wt% NH₄F). Hall Effect measurement on electrical properties at room temperature showed that carrier density and mobility were 10¹⁶-10¹⁸ cm⁻³ and 10²-10³ cm²v⁻¹s⁻¹ respectively. As increasing fluorine concentration, the carrier density increases, conversely mobility of carriers decreases as the fluorine concentration increases.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์งามนิศย์ แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมทั้งการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพพล สุทธิศิริ, อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ และคุณกิตติศักดิ์ชัย แนนจันท์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Philips รุ่น PW-3020 ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร, เครื่องยูวี-วิสิเบิลแบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อจัสโก้ รุ่น 7800 (UV-Visible spectrometer JASCO 7800)

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้นำแปลตประจุมใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรวงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร, เครื่องยูวี-วิสิเบิลแบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อจัสโก้ รุ่น 7800 (UV-visible spectrometer JASCO 7800), และชุดวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์(Hall Effect) ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชาญ เชชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องดิจิทัลเพื่อใช้ในการถ่ายรูปและจัดสรรเงินของภาควิชาเพื่อใช้ในการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ อาจารย์รัชชัย ขาวประเสริฐ และคุณจรินทร์ ไพริไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลองโครงการ

พิเศษ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณวีรชัย ทิภา, คุณอุปถัมภ์ นาครัถย์, คุณสุกฤษฎี เกิดแสง, คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์, คุณจิตติกร จรรยาธรรม นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์สเปกโตรโฟโตไลซิส, แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆและคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าทุกคน ที่ให้การอุปการะสนับสนุนทุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้



นายบุญประเสริฐ เงินแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 โครงสร้างผลึก	4
2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายใต้โครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ	4
2.1.2 คำนีมีลเลอร์	4
2.1.2.1 คำนีมีลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายใต้โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	5
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบจุลภาคในผลึกจริง	5
2.1.3.1 ข้อบกพร่องของผลึกแบบเวเคนซี	5
2.1.3.2 เกรนและขอบเขตรอนต่อของเกรน	6
2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	7
2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	8
2.2 สมบัติทางการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	9
2.2.1 การเกิดสีของผลึก	9
2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการ	9

การดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์อน

๑1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	13
2.2.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.2.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	16
2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	17
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล	17
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	18
2.3.2.1 วิธีโดยตรง	18
2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วไฟฟ้าปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	19
2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วไฟฟ้าปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	21
2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น	22
2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยใช้วิธีขั้วความร้อน	24
2.5 ปฏิกิริยาของฮอลล์	25
2.6 การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง SnO_2/F ด้วยวิธีการสเปร์ย์ไพโรไลซิส	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วิธีทดลอง	29
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์	29
3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์	31
3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	33
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	33
4.2 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	35
4.3 ผลการศึกษาการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	35
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อกำหนดหาช่องว่างแถบพลังงาน	37
4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทาน	40
4.6 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

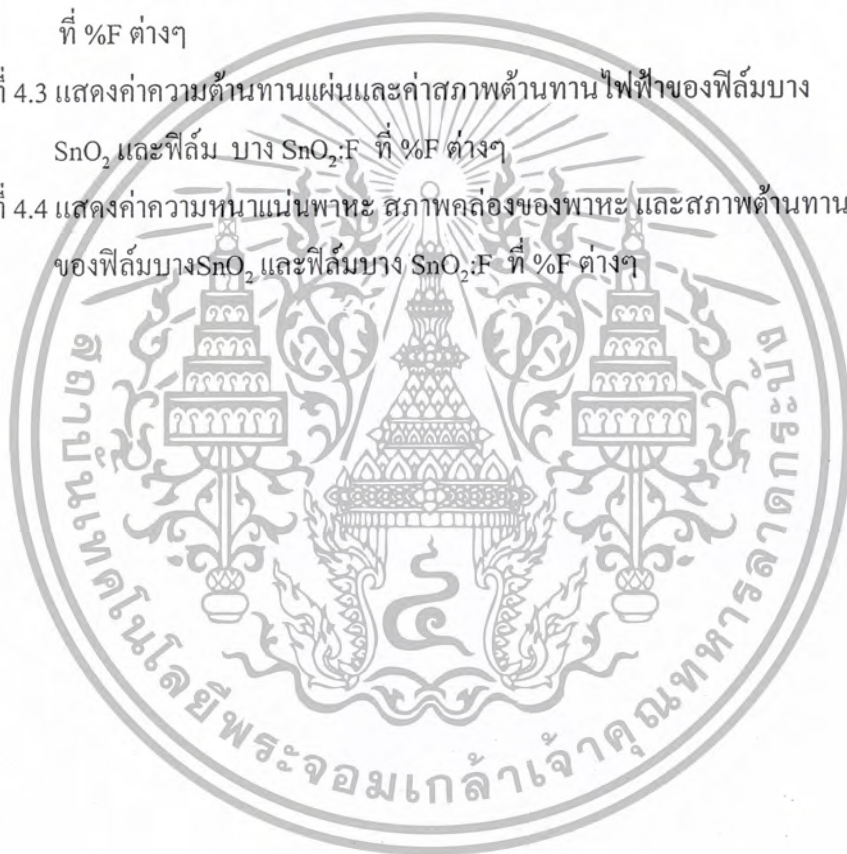
	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
เอกสารอ้างอิง	46
ภาคผนวก	48
ประวัติ	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส	30
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางทินออกไซด์และฟิล์มบางทินออกไซด์ เจือด้วย ฟลูออรีน ที่ ความเข้มข้นต่างๆ	36
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ	40
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์ม บาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ	42
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ	43



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ ของทินออกไซด์	4
รูปที่ 2.2 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	5
รูปที่ 2.3 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวนเคนซี	
(ก) ชนิดชอตกี	
(ข) ชนิดเฟรนเคิล	6
รูปที่ 2.4 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	7
รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	8
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่าง ๆ	
(ก) ฉนวน	
(ข) สารกึ่งตัวนำ	
(ค) ตัวนำ	9
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d	10
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	12
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟนอนกับพลังงาน โฟนอน ของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	13
รูปที่ 2.10 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ โดยวิธีวัดโดยตรง	18
รูปที่ 2.11 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	19
รูปที่ 2.12 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า	21
รูปที่ 2.13 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.14 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์	25
รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO ₂ :F	30
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เตรียมได้	33
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือด้วย F =10% ที่เตรียมได้	33
รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือด้วย F =20% ที่เตรียมได้	34
รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือด้วย F =30% ที่เตรียมได้	34
รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือด้วย F =40% ที่เตรียมได้	34
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่เจือด้วย F =20%	35
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางทินออกไซด์และฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	36
รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางทินออกไซด์และฟิล์มบางทินออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ	37
รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E _g) จากความสัมพันธ์ระหว่าง (αhν) ² กับพลังงานโฟตอน (hν) ของฟิล์มบาง SnO ₂ ที่ไม่มีการเจือ F	39
รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E _g) ของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ :F ที่ %F ต่างๆ	39
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ :F ที่ %F ต่างๆ	41
รูปที่ 4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ :F ที่ %F ต่างๆ	41
รูปที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง SnO ₂ และฟิล์มบาง SnO ₂ :F ที่ %F ต่างๆ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสารกึ่งตัวนำนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ สามารถแสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนกับตัวนำ และสามารถควบคุมความหนาแน่น และชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้โดยการเจือสิ่งเจือปนของธาตุที่เหมาะสมลงไป จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เราสามารถนำมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มากมาย เช่น ไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) วงจรรวม (integrated circuit) และเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ทันทีและกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำสายสิ่งแวดล้อมเพียงติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแจ้งแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี

ฟิล์มบาง SnO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ ที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ฟิล์มบาง SnO_2 มีศักยภาพในการประดิษฐ์เป็นกระจกสะท้อนความร้อน (heat mirrors) หรือขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting electrode) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CuInGaSe}_2$ ให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงราว 18% ซึ่งฟิล์มบางของ SnO_2 จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางของ SnO_2 จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ดีควรมีความต้านทานต่ำและเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในย่านตามองเห็นได้มีค่าสูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น วิธีการสปัตเตอริง, วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ, วิธีการระเหยสารเคมี, วิธีการอบสารละลายเคมี และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสเป็นวิธีที่มีข้อดีคือ สามารถเตรียมสารได้ขนาดใหญ่ตามต้องการ ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากนัก จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

การเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 นิยมเจือ F หรือ Sb เพื่อลดความต้านทาน เป็น $\text{SnO}_2:F$ ทำให้คุณสมบัติการส่งผ่านแสงและความต้านทานของฟิล์มเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขต่าง ๆ ในการใช้อุณหภูมิของแผ่นสไลด์ (heat substrate) และความเข้มข้นของสารเจือ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : F$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส
2. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : F$ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารเจือ
3. เพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : F$ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
4. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction method)
5. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง (optical transmission) แล้วนำมาศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : F$ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น
7. วัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : F$ โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสเนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ และให้ประสิทธิภาพที่สูง จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานมีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสจัดเตรียมวัสดุต่าง ๆ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{F}$
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{F}$ บนกระจกสไลด์โดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีมีความหนาสม่ำเสมอและติดแน่นดีกับกระจกสไลด์
3. ทำการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
4. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
5. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการวัดการส่งผ่านแสงเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น
7. ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษนี้ คือ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{F}$ ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2 : \text{F}$
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงสร้างผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า, คุณสมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

2.1 โครงสร้างของผลึก

2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ [1-4]

โครงสร้างผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส(basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้น โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำดีบุกออกไซด์จะมีลักษณะโครงสร้างแบบเตตระโกนัล รูไทล์



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ ของดีบุกออกไซด์

2.1.2 ดัชนีมิลเลอร์[3-4]

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นในรูปของค่าดัชนีมิลเลอร์ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่ชื่อ มิลเลอร์ (Miller)

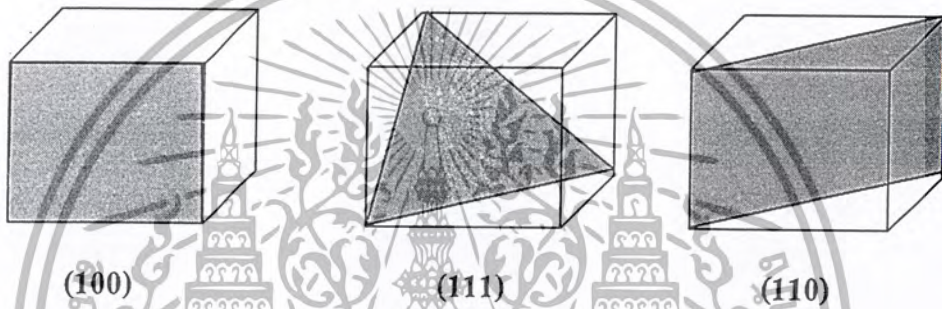
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก[3-4]

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกดังแสดงในรูปที่ 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



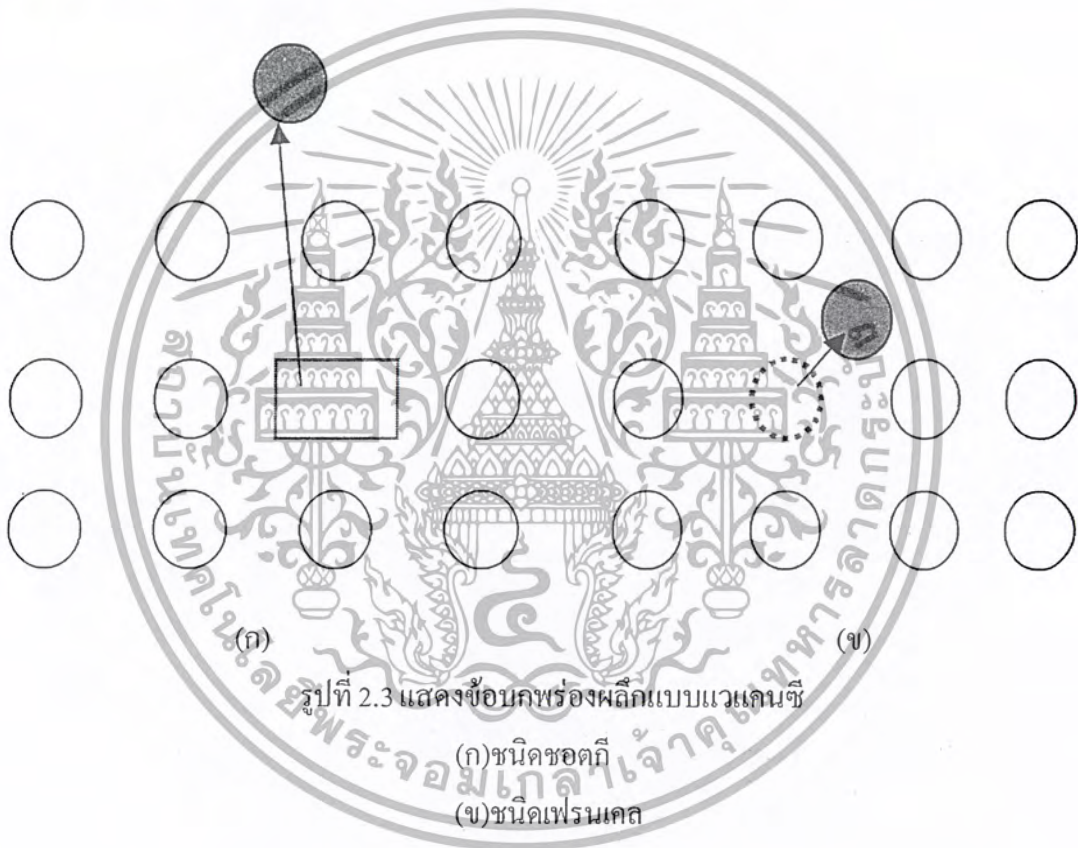
รูปที่ 2.2 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภายในผลึกจริง (real crystal)[3-4]

ผลึกจริงเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงสร้างผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซัปสติวชันนัล (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงข้อบกพร่องของผลึกแบบแวนแคนซีและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.1.3.1 ข้อบกพร่องของผลึกแบบเวแคนซี[3-4]

ข้อบกพร่องผลึกแบบเวแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุดซึ่งก็คือ ข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึกจะแบ่งเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือข้อบกพร่องผลึกแบบชอตคกี (schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอม หรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ในที่บริเวณที่เป็นผิวหน้า (surface) ของโครงผลึก และข้อบกพร่องชนิดเฟรเนเคิล (Frenkel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือ ไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างดังแสดงในรูปที่ 2.3

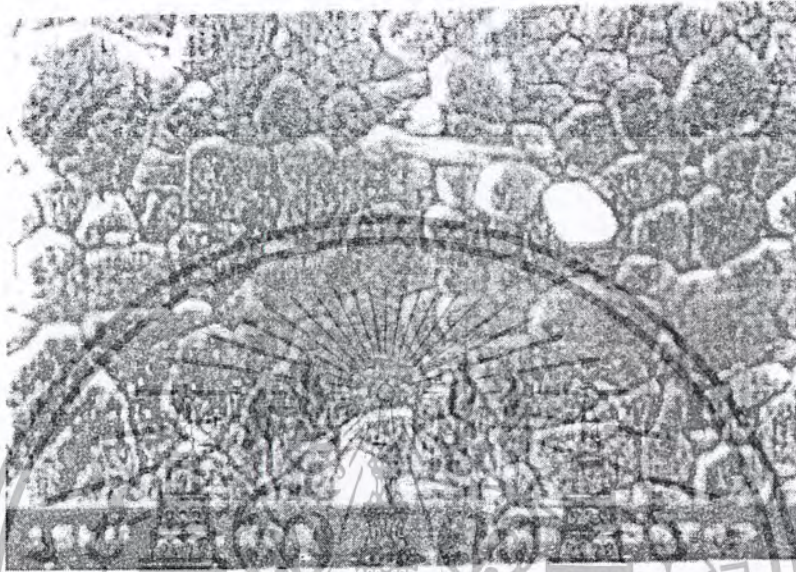


2.1.3.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน[3-4]

เกรน คือ บริเวณที่ โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและแนวพรมแดนระหว่างเกรนต่าง ๆ ที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันเรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.4 ผลึกที่มีเกรนเดียว(single grain) จะเรียกว่าผลึกเดี่ยว หรือผลึกเอกพันธ์ (single crystalline) ผลึกที่มีหลายเกรนเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (poly crystalline) เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไปจากกรณีผลึกในอุดมคติได้แก่ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสกัดกั้นการไหลของกระแส หรือของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขตรอยต่อของเกรนมักอะตอมโมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [3-4]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง $0.2-2 \text{ \AA}$ ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq 2d$ หรือความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (inter-atomic spacing) คือให้ $\lambda \approx 10^{-8} \text{ cm}$ หรือ $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ ตกกระทบผลึกที่ทำหน้าที่คล้ายเกรตติง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อแบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เรียกว่า "กฎของแบรกก์" ดังสมการ

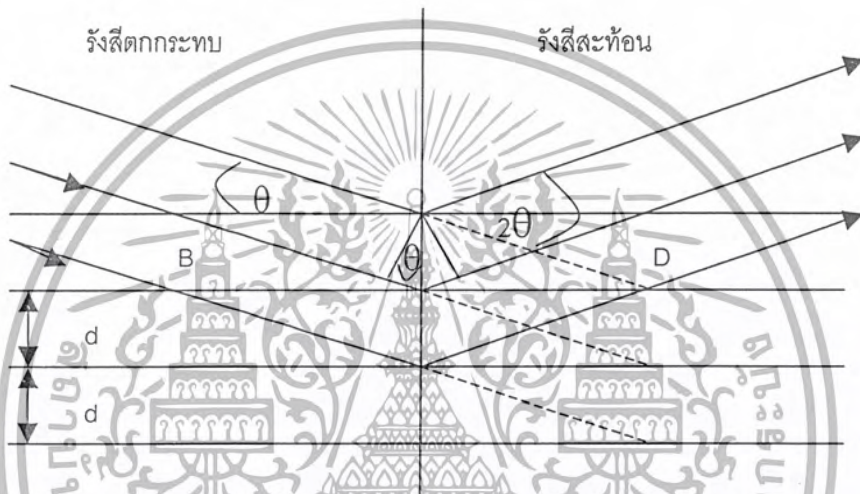
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

โดย

$$\lambda (\text{A}^\circ) = \frac{12.4}{E (\text{keV})} \quad \text{และ} \quad E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถไปคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์[2-3]

โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล รูไทล์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบเตตระโกนัล บอดี เซ็นเตอร์ โดยที่ $a = b \neq c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

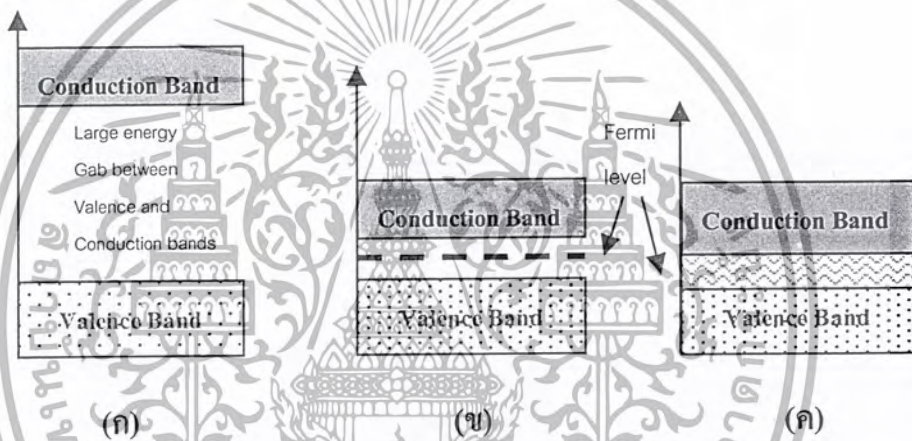
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \sqrt{\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติทางการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ[3-4]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของการเกิดสีของผลึก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ SnO_2 ทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำและนำมาทำการคำนวณขนาดช่องว่างของแถบพลังงาน (energy gap)

2.2.1 การเกิดสีของผลึก[3-4]



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่าง ๆ

(ก) ฉนวน

(ข) สารกึ่งตัวนำ

(ค) ตัวนำ

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ เป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ลุดลอมบี้อัดเหนี่ยวไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อยและแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำและแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยและเรียกบริเวณนี้ว่า "บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap)" ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องว่างนี้ว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g นำมาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งแยกสารชนิดต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3$ eV สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3$ eV และตัวนำมีแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน ออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น ถ้าพิจารณาฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_1 แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient : α) ได้จากสมการที่ (2.4) และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอนได้นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วยซึ่งเป็นที่ยอมรับใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_2 = I_1 \exp(-\alpha d) \quad (2.4)$$

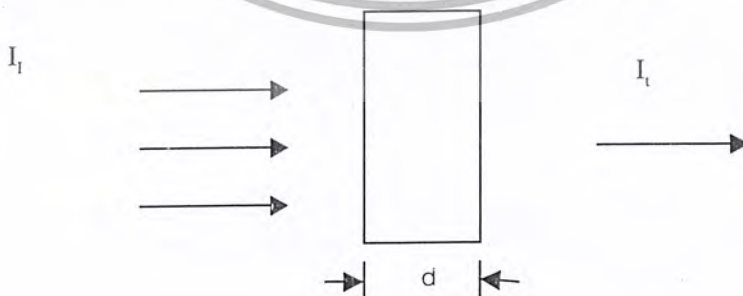
เมื่อ

I_1 = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

I_2 = ปริมาณความเข้มแสงที่ถูกตกกระทบสารตัวอย่าง

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธีทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาข้างต้น คือ การสร้างสถานะพื้นฐานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (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) ของอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้นคือเมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราเห็นผลึกมีสีได้

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน[3-5]

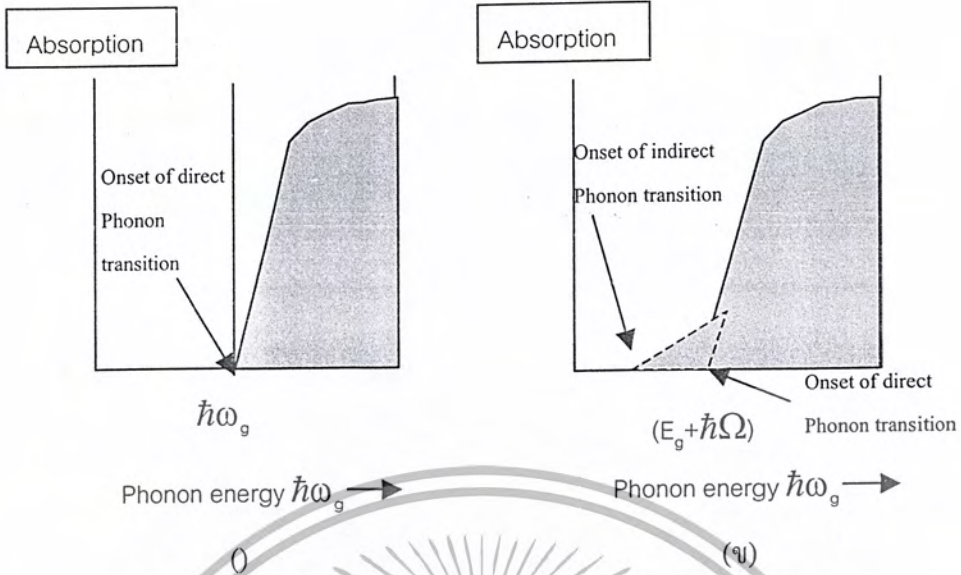
โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น (wave vector) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega_e = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.9 (ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแบบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากันดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานในกรณีนี้มีกระบวนการสร้าง

โฟนอนเกิดขึ้นเมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอนนั้นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K = k_c$ ออกมาจึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_c + \hbar\Omega$) และอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ($E_{v,ct}$) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟนอนกับพลังงานโฟตอน จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโครงสร้างจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิดการสั่นและสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืนโฟนอนแล้วก็จะตามด้วยกระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนซึ่งจะมีค่าเท่ากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระต่อไป



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 K)
 (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง ในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้าง โฟนอน

2.2.3 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [5]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีสภาพของแม่เหล็ก (μ) = 1 จะได้สมการคลื่นเป็น

$$E = E_0 \exp[i(k^* r - \omega t)] \tag{2.5}$$

$$H = H_0 \exp[i(k^* r - \omega t)] \tag{2.6}$$

เมื่อ

- E คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0
- H คือ สนามแม่เหล็กที่มีแอมพลิจูด H_0
- K = $k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดยที่

- k_1 คือ เวกเตอร์จริง k_2 คือเวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k^*k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$
- ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- c คือ ค่าความเร็วแสง
 ω คือ ความถี่เชิงมุม
 t คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่นและความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

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

โดยที่

n = ดัชนีหักเห

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

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

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

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศ x เป็น

$$E_x = E_{0x} \exp[i\omega(n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (2.9)$$

E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง x

จากสมการที่ (2.9) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$I \propto EE^* \quad (2.10)$$

ดังนั้นจะได้

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

หรือ

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

$$I = I_0 \exp(-\alpha X) \quad (2.11)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ;
 I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบ ;
 λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ ; (nm)

จากสมการที่ (2.11) เขียนได้ใหม่เป็น (2.12)

$$\alpha = \frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dx} \right) \quad (2.12)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.12) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

2.2.4 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [3-5]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงาน โฟตอนที่มากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยการพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งเรียกว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงดังแสดงในรูปที่ 2.8 ก. โดยสารกึ่งตัวนำ SnO_2 มีการย้ายสถานะพลังงานในกรณีนี้ และการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออปติคัลเมทริกซ์อิลิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าวคือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบยินยอมและแบบต้องห้ามได้ดังนี้ คือ

การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned} (\alpha h\nu) &= \frac{sch}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &= A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = \frac{sch}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= A(h\nu - E_g)^3 \quad (2.14)$$

โดยที่ μ	คือ มวลลดทอน (reduced electron-hole mass)
H_{cv}	คือ ออปติคอลเมตริกซ์อีลิเมนต์ (optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำ
E_g	คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
$h\nu$	คือ พลังงาน โฟตอน

2.2.5 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ[3-5]

สำหรับในการทดลองของเราเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission : %T) ผ่านสารตัวอย่าง โดยที่พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ (I_0) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (I_t) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น (λ) ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) / [1+R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad (2.15)$$

$$R = I_r/I_0 = [(n-1)^2 + K^2] / [(n+1)^2 + K^2] \quad (2.16)$$

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 (2.15) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าทอม $(1 - R^2)$ มีค่าคงที่และสมการที่ (2.17) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln(I_0/I_1) \tag{2.18}$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (2.20) ยังมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (α_0) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (2.4) และเราสามารถหา E_g ได้จากสมการที่ (2.13) หรือ (2.14) หรือทำได้โดยการลากเส้นตรงโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั้นเองและลักษณะของกราฟจะแสดงให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังที่แสดงอยู่ในรูป 2.9 (ก) และ (ข)

2.3 สมบัติทางไฟฟ้า [3-4,6]

จากทฤษฎีแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [3-4,6]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า 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 เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

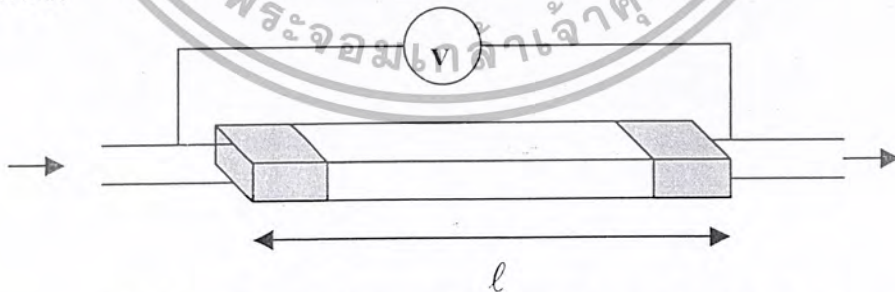
$$\sigma = 1/q(\mu_n + \mu_p) \quad (2.20)$$

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า[6-7]

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ ส่วนตัวของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปใน ชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.3.2.1 วิธีวัดโดยตรง (direct method) [6-7]

โดยทั่วไปแล้วการวัดความต้านทานเฉพาะทางไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง หมายถึง การวัดค่าความต้านทานรวมของสาร แล้วถึงมาวัดความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสารที่ต้องการวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น ทรงกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมกันซึ่งแสดงให้เห็นได้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะโดยวิธีวัดโดยตรง

จากค่าที่ทราบ คือกระแสและศักย์ไฟฟ้านี้นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานเฉพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทาน

จำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่วัด

$$R = \rho l / A \quad (2.21)$$

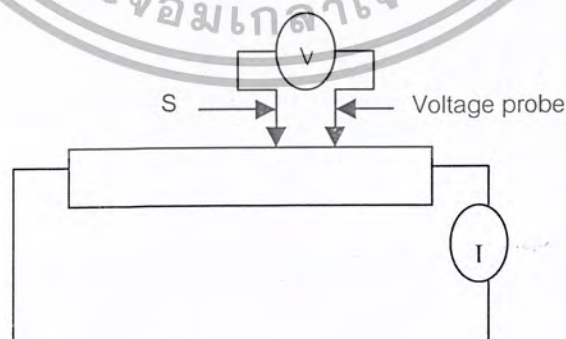
$$\rho = R(A / l) = (VM)(A / l) \quad (2.22)$$

จะเห็นว่าวิธีเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วยกัน

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี มักจะมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงๆ ของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์เพราะที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ดีนั้นจะตรวจสอบได้ยากกว่า จึงแก้ไขได้ด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงๆ ถ้าทำเช่นนี้ค่าความผิดพลาดก็จะน้อยมาก

2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe method) [6-7]



รูปที่ 2.11 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสารตัวอย่าง เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้ โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้ จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equipotential line) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าอยู่ในแนวเส้นสมศักย์ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สักส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้า - ออกจะต้องมีค่ามากกว่า 3 เท่า ($I > 3A$ เมื่อ I คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส)

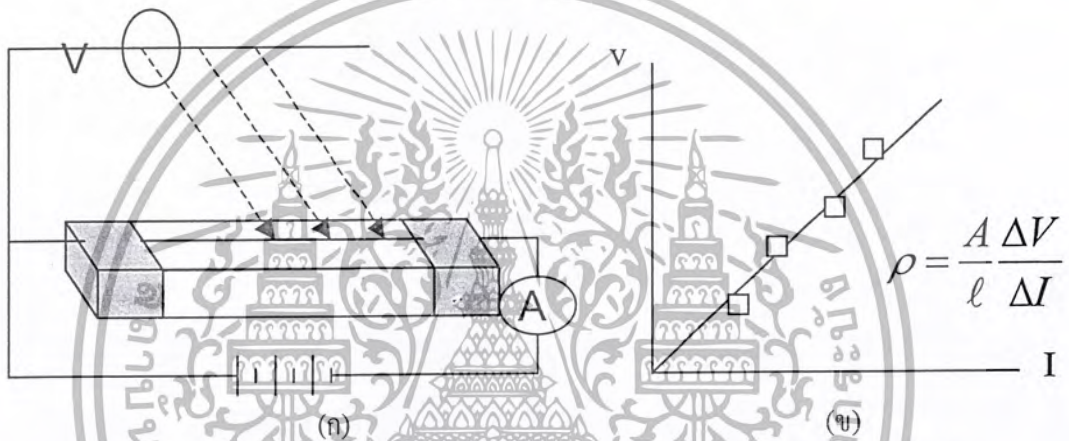
ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้นหรือสี่ขั้วเชิงเส้น

- วัดศักย์ที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า - ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์บนสารกึ่งตัวนำนั้นจะต้องเป็นโลหะแข็ง และนำไฟฟ้าได้ดี เช่น พลาตินัม ทังสเตน เงิน เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่างจะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่างว่ากำลังวัดอยู่บนระนาบใดหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องเป็นผลึกสมบูรณ์มีเกรนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรนที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลาย ๆ จุดและจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์สม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตรฐานบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

- แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
- แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method) [6-7]

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้นเป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม วิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้วซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วมีปัญหา 2 จุด และ 4 จุด คล้าย ๆ กัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่าง ๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้าออก ตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนมีลักษณะเส้นเล็กและแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกัน จัดให้ห่างเท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากันในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะพอจะมีแนวความคิดได้ดังนี้เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริงๆแล้วจะใช้การหาค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการปัวซอง ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปแล้ว จะหาได้จากกระแสลัดเข้าไปในสารตัวอย่างและวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะโดยสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยอีก 2 ข้อ กล่าวคือ

ขั้วทั้งสองต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย

สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้งสองจะจะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (hemisphere) โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิตย์เมื่อมีการวัดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่างจะสามารถหาค่าศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใดๆได้

$$V = K/r \quad (2.23)$$

เมื่อ r คือระยะใดๆที่จะหาค่าศักย์ที่จุดที่ให้กระแส และ K คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของกระแสที่ลัดเข้าไปและรูปร่างของสารตัวอย่าง

2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น[6-7]

ถึงแม้ว่าการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มาตรฐานมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่าง ๆ ซึ่งพอจะสรุปเป็นข้อย่อ ๆ ได้ดังนี้

1.ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้ จะรวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่างเข้าได้ด้วย ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่วางหัววัดได้ และรูปร่างของสารตัวอย่างจะมี

ความสม่ำเสมอหรือมีรูปทรงทางเรขาคณิต เพราะความยาวและพื้นที่หน้าตัดมักจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเสมอ

2. การรั่วไหลของกระแส

การรั่วไหลอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบ และ บริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจจะเกิดจากความผิดปกติทางผลึกภายในอีกด้วย

3. อุณหภูมิ

- สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะ ทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะมีผลกระทบน้อยกว่าฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีผลควรทำการวัดหลาย ๆ จุดและจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์สม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไขด้วยวิธีตั้งขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตรฐานบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

4. แสง

ขณะทำการวัดควรมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้นได้ ส่งผลทำให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกัน แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สารตัวอย่าง ทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

5. ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้จะหลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจามกมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อยสำหรับสารตัวอย่างจำพวก โลหะแต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นจึงพยายามวัดในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

6. ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้น กับสารตัวอย่างชนิดที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักจะมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสทำให้เกิดข้อผิดพลาด

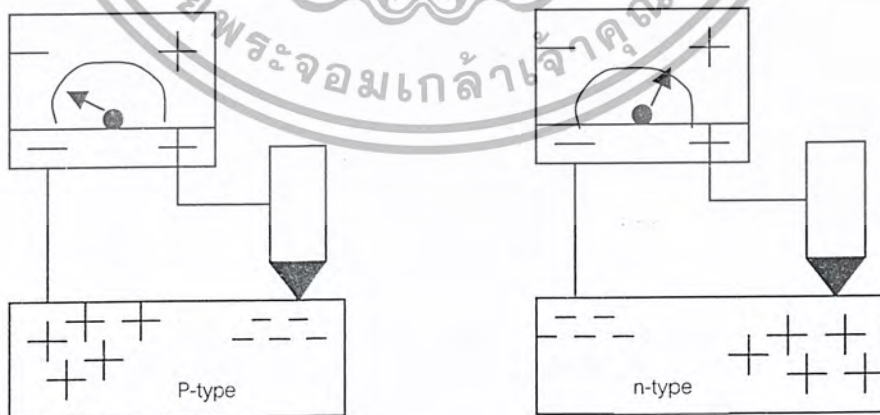
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาดการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบและเลือกชนิดของโลหะที่ใช้มาเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อนค่าที่จะเป็นที่ยอมรับ การทดสอบความต้านทานขั้วสัมผัสมักจะพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้บางอย่างอาจหลีกเลี่ยงได้ บางอย่างก็อาจหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของสารตัวอย่างจากหลักโดยทั่วไปแล้วควรจะวัดหลาย ๆ ครั้งที่เงื่อนไขเดียวกันและวัดหลาย ๆ วิธี เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนและเชื่อถือได้ และในการแสดงค่าความต้านทานของสารตัวอย่างมักจะบอกคู่ไปกับค่าที่วัดได้ว่าวัดด้วยวิธีใด

2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยใช้วิธีขั้วความร้อน (hot probe) [3-4]

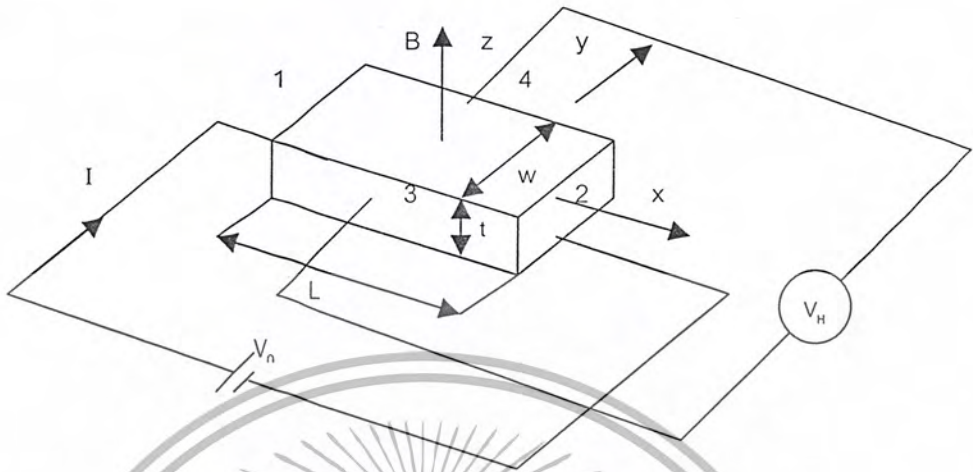
วิธีขั้วความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือจี้หัวแรงขับเคลื่อนไปตรงบริเวณที่ปรากฏเป็นรอยค่างของผิวหน้าฟิล์มบาง รอยค่างนี้เกิดจากบริเวณที่ระจกเสียบเข้ากับแท่งเทพลอน ดังนั้นฟิล์มจึงเคลือบไม่ติด โยงสายไฟจากหัวแรงเข้ากับขั้วบวกของ โวลต์มิเตอร์ ถ้าเข็มของ โวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกฟิล์มบางนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของ โวลต์มิเตอร์ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของ โวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็ม โวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของ โวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) [3,7]



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์

สำหรับโลหะ หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ p พาหะตัวนำจะมีเพียงชนิดเดียว (อิเล็กตรอนหรือโฮล) ถ้าพาหะตัวนำมีประจุ q และสภาพเคลื่อนที่ได้ μ โดยอาศัยรูปที่ 2.14 เราพบว่า พาหะตัวนำดังกล่าวจะถูกแรงกระทำ จากทั้งสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก \vec{B} (ในทิศทาง +Z) โดยอาศัยนิยามของสภาพเคลื่อนที่ได้เมื่อคิดถึงผลของสนามแม่เหล็กร่วมด้วย เราสามารถเขียนความเร็วลอยเลื่อนได้เป็น

$$\vec{v} = \pm\mu(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{m/s}) \quad (2.24)$$

โดยที่เครื่องหมายบวก ใช้สำหรับโฮล และเครื่องหมายลบใช้กับอิเล็กตรอน

สำหรับในพิกัดฉาก x, y, z เราสามารถเขียน $\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$

โดยที่

$$v_x = \pm\mu(E_x + v_y B_z) \quad (2.25)$$

$$v_y = \pm\mu(E_y + v_x B_z) \quad (2.26)$$

$$v_z = \pm\mu E_z \quad (\because B_x = B_y = 0) \quad (2.27)$$

เนื่องจาก ความหนาแน่นกระแส $\vec{J} = nq\vec{v}$ ดังนั้น ความหนาแน่นกระแส ในแต่ละ component เขียนได้เป็น

$$J_x = \pm\mu(nqE_x + J_y B_z) \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_y = \pm \mu(nqE_y + J_x B_z) \quad (2.29)$$

$$J_z = \pm \mu nqE_z \quad (2.30)$$

ถ้าจ่ายกระแสให้กับวัสดุตัวนำ ตามรูปที่ 2.14 โดยต่อขั้วของแหล่งจ่ายไฟคร่อมด้าน 1 และ 2 จะทำให้กระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำดังกล่าวในทิศทาง +x ดังนั้น current density ในแนว y และ z จึงเป็นศูนย์ กล่าวคือ $J_y = J_z = 0$ ดังนั้น

$$E_y = \frac{J_x B_z}{nq} \quad (\text{V/m}) \quad (2.31)$$

สมการที่ (2.31) แสดงให้เห็นว่าเกิดสนามไฟฟ้าในแนว y คร่อม ด้าน 3 และ 4 ขึ้น โดยสนามไฟฟ้า E_y นี้ทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะโดยขนาดของแรงเท่ากับแรงกระทำที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก B_z แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน

เพื่อที่จะให้เห็นภาพ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลองพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระใน สารกึ่งตัวนำชนิด n เมื่อวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.14 โดยผ่านกระแสดังรูป อิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงกระทำเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น $F_{By} = -qv_x B_z$ ทำให้ด้าน 4 ของสารกึ่งตัวนำมีประจุลบและด้าน 3 มีประจุลบ (ดูรูปที่ 2.14 ประกอบ) ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ตามขวางในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage, V_H) และมีสนามไฟฟ้า E ในทิศทาง -y สนามนี้ทำให้เกิดแรงกระทำขนาด qE ในทิศ +y ($F_{Ey} = qE_y$) หักล้างแรงจากสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ

$$\begin{aligned} F_y + F_{-y} &= 0 \\ qE_y - qv_x B_z &= 0 \\ \therefore E_y &= \frac{qv_x B_z}{q} = \frac{nqv_x B_z}{nq} = \frac{J_x B_z}{nq} \end{aligned} \quad (2.32)$$

กำหนดให้สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) R_H เขียนได้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.33)$$

เพื่อความสะดวกในการหาค่า R_H เราจำเป็นต้องเขียนให้อยู่ในเทอมของค่าที่วัดได้จากการทดลอง V_H , I (ความหนาของวัสดุที่นำมาศึกษา), l และ B_z

เนื่องจาก $V_H = V_3 - V_4 = WE_y$ (เมื่อ W คือ ความกว้างของวัสดุที่นำมาศึกษา) และ

$$J_x = \frac{I}{Wl} \quad (\text{ตามนิยามของ current density ในแนวแกน x})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore R_H = \frac{V_H t}{IB_Z} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.31) และ (2.32) เราพบว่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะตัวนำ (n) ดังนี้

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \left(\frac{m^3}{C} \right) \quad (2.35)$$

ดังนั้น การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ ทำให้เราได้ทราบถึงค่าความหนาแน่นของพาหะ ประจุของพาหะ รวมถึงสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะ (Hall mobility) μ_H ตามสมการ

$$\mu_H = |R_H| \sigma \quad (m^2 (V.s)^{-1}) \quad (2.36)$$

เมื่อ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า

สำหรับในกรณีที่วัสดุตัวนำมีพาหะตัวนำทั้งสองชนิดคือ อิเล็กตรอนและโฮล เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ได้ดังนี้

เราสามารถเขียน current density ของอิเล็กตรอนและโฮลในแนวแกน y ได้เป็น

$$J_y = n_h e v_{hy} - n_e e v_{ey} \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.37)$$

เมื่อ v_{hy} และ v_{ey} คือ ความเร็วลอยเลื่อนของโฮลและอิเล็กตรอนในแนวแกน y โดยอาศัยสมการที่ (2.25), (2.26) เราสามารถเขียน J_y ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2.26)} \quad v_y &= \pm \mu (E_y - v_x B_z) \\ \therefore J_y &= n_h e \mu_h (E_y - v_x B_z) + n_e e \mu_e (E_y - v_x B_z) \\ J_y &= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h v_x B_z - n_e e \mu_e v_x B_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (2.25)} \quad v_x &= \pm \mu (E_x + v_y B_z) \\ \therefore J_y &= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h B_z (\mu_h (E_x + v_{yh} B_z) + n_e \mu_e B_z (\mu_e) (E_x + v_{ye} B_z)) \\ &= (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - n_h e \mu_h^2 B_z E_x - n_h e \mu_h^2 B_z^2 v_{yh} + n_e e \mu_e^2 B_z E_x + n_e e \mu_e^2 B_z^2 v_{ye} \end{aligned}$$

(กำหนดให้ ขนาดของ B มีค่าน้อยๆ จะทำให้เทอมที่ 3 และ 5 เป็น 0)

$$\therefore J_y = (n_h \mu_h + n_e \mu_e) e E_y - (n_e \mu_e^2 - n_h \mu_h^2) e B_z E_x \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2.38)$$

จากนั้นเราสามารถพิจารณาเงื่อนไข $J_y = 0$ (เพราะเป็นเงื่อนไขที่ทำให้เกิด สนามไฟฟ้าระหว่างด้าน 3 และ 4 ซึ่งทำให้เกิดแรงไฟฟ้าหักล้างกับแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก และทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่)

โดยอาศัยนิยามของ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์

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

โดย σ หาได้จากสมการ

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

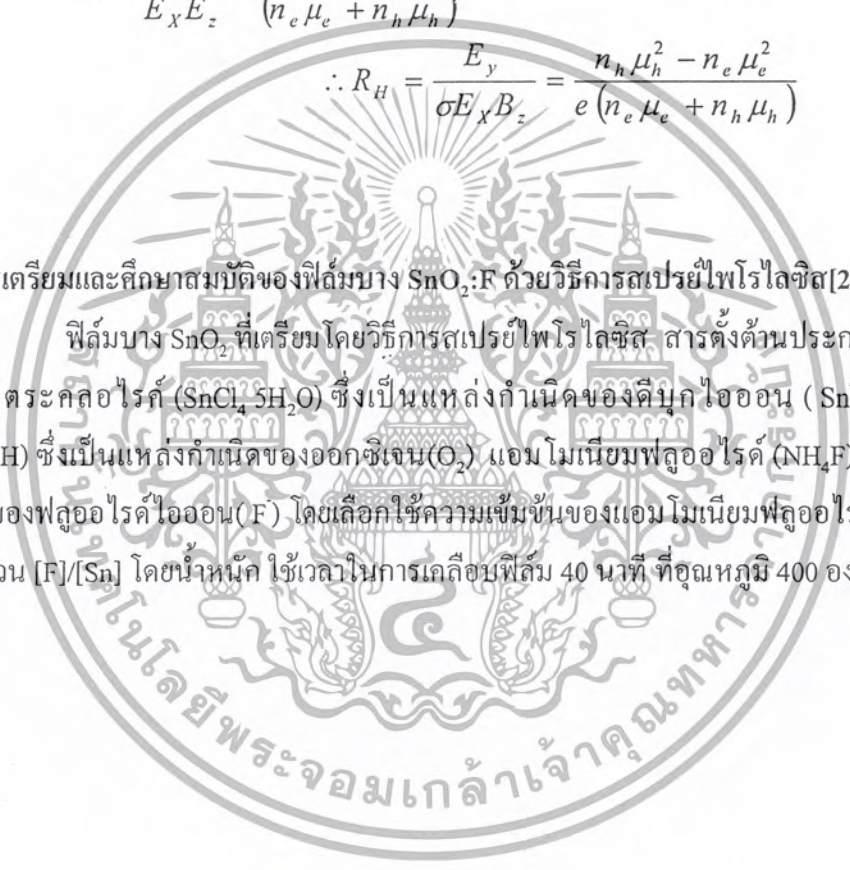
และ $\frac{E_y}{E_x E_z}$ หาได้จากสมการที่ (2.37) เมื่อ $J_y = 0$

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

$$\therefore R_H = \frac{E_y}{\sigma E_x B_z} = \frac{n_h \mu_h^2 - n_e \mu_e^2}{e (n_e \mu_e + n_h \mu_h)} \quad (2.39)$$

2.6 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส[2.8-12]

ฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส สารตั้งต้นประกอบไปด้วย ดีบุกเตตระคลอไรด์ ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของดีบุกไอออน (Sn^{4+}) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของออกซิเจน (O_2) แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของฟลูออไรด์ไอออน (F^-) โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ด้วยอัตราส่วน $[\text{F}]/[\text{Sn}]$ โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 40 นาที ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ โดยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส พร้อมทั้งทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วยอะตอมของฟลูออรีน (F) ทั้งก่อนและหลังเจือ รวมทั้งศึกษาอุณหภูมิการเคลือบฟิล์มว่ามีผลอย่างไรกับฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ($\text{SnO}_2:\text{F}$) การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้น จะศึกษาพื้นที่ผิวของฟิล์มบางจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และทำการศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และศึกษาการส่งผ่านทางแสง เพื่อศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของฟิล์มบางและนำไปคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานตลอดทำการตรวจสอบชนิดของการนำไฟฟ้าและนอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และทำการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์

3.1 วิธีการทดลอง

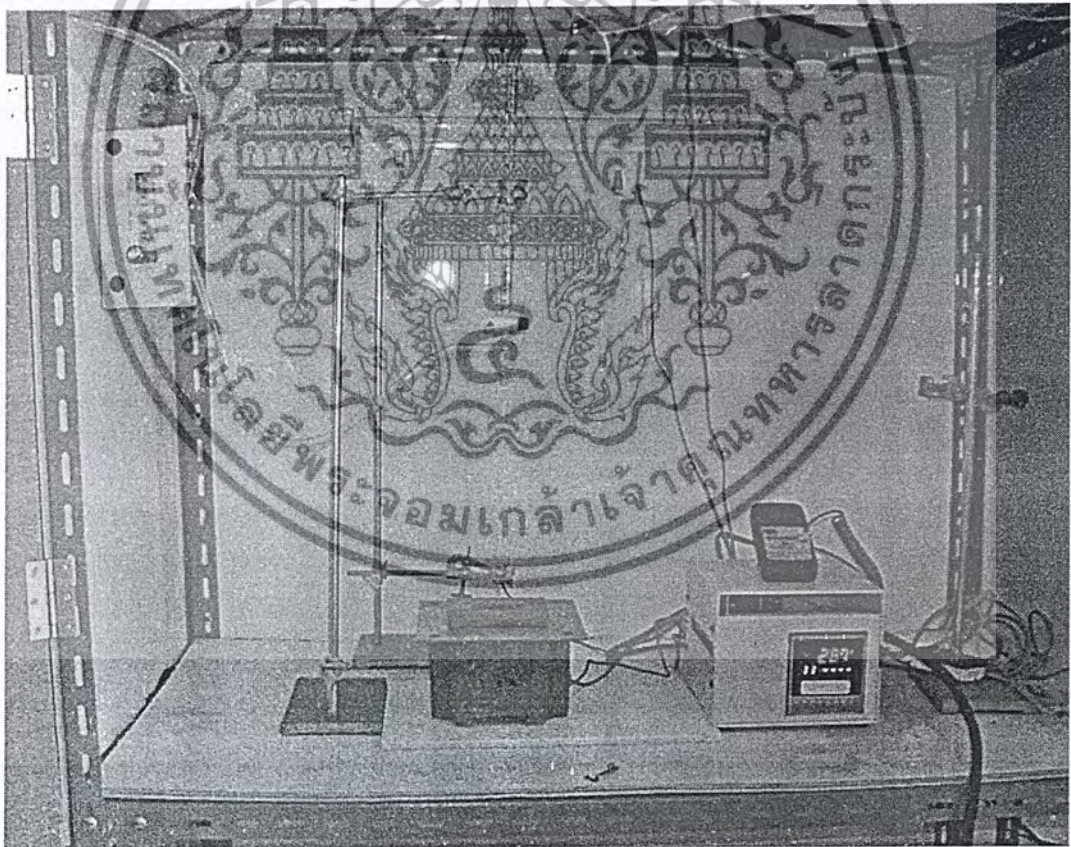
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์[8-13]

อุปกรณ์หลัก คือ แท่นยึดหัวพันที่ไซบรจตุรัสตั้งต้น โพลเรทมิเตอร์(flow rate meter) ใช้สำหรับควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในโครเจน ท่อสายยาง เต้าให้ความร้อนโดยให้ความร้อนที่ $300-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ แผ่นทองแดงใช้สำหรับวางแผ่นรองรับ กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นรองรับฟิล์ม เทอร์โมคัปเปิล และสารตั้งต้นต่างๆประกอบไปด้วยทินเตตระคลอไรด์ ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) โดยที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออไรด์แสดงดังตารางที่ 3.1 สารตั้งต้นต่างๆจะถูกเทลงในหัวพันที่มีตัวทำละลาย 20 ml โดยที่ให้

- ความเข้มข้นของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ = 0.02 M
- ความเข้มข้นของ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ = 0.02 M
($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 11.6 ml และ น้ำ DI 8.4 ml)
- ความเข้มข้นของสารเจือ F ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เป็น 10%, 20%, 30%, 40% โดยน้ำหนักของ $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

สารตั้งต้น	ปริมาณ(g)
$\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.4028
NH_4F (0%wt) ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}=0$)	0.0000
NH_4F (10%wt) ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}=0.1$)	0.1402
NH_4F (20%wt) ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}=0.2$)	0.2805
NH_4F (30%wt) ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}=0.3$)	0.4208
NH_4F (40%wt) ($\text{NH}_4\text{F}/\text{SnCl}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}=0.4$)	0.5611

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์[4]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง SnO_2 จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 12 และ 25 mm ซึ่งทำความสะอาดเป็นอย่างดี ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ
- 2) นำไปทำความสะอาดด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene, TCE) เพื่อขจัดคราบไขมัน, อะซีโตน (acetone) เพื่อขจัด TCE, เอทานอล (ethanol) เพื่อขจัดอะซีโตนและน้ำปลอดประจุตามลำดับ
- 3) นำกระจกสไลด์จากข้อ 2 ไปแช่ในสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กับน้ำปลอดประจุปริมาตร 10 ml และ 100 ml ตามลำดับ เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุอีกครั้ง
- 4) จากนั้นนำกระจกสไลด์ไปใส่น้ำปลอดประจุ และทำการล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 3 รอบ รอบละ 10 นาที
- 5) นำกระจกสไลด์ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ก็จะได้กระจกสไลด์ที่แห้งและสะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 [8-13]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 ด้วยวิธีการสเปรย์ไพโรไลซิส ประกอบด้วยสารละลาย $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.02 mol สารละลาย $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 0.02 mol บรรจุใน หัวพ่นที่บรรจุ น้ำปลอดประจุ 20 ml ในการเจือด้วยอะตอมของ F จาก NH_4F ด้วยอัตราส่วนระหว่าง $[\text{F}]/[\text{Sn}]$ 10%, 20%, 30%, 40% โดยน้ำหนักของ SnCl_4 ซึ่งขั้นตอนมีดังนี้ ต่อไป

1. ทำความสะอาดและเตรียมกระจกสไลด์
2. ชั่งสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วย ทินเตตระคลอไรด์ ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) และ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
3. เทสารละลายจากข้อ 2 ลงในหัวพ่น
4. นำกระจกสไลด์มาวางบนเตาให้ความร้อน
5. ปรับเตาให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิที่ 400°C โดยใช้เทอร์โมคัมเบิล เป็นตัววัดอุณหภูมิ
6. ปรับให้สารละลายไหลลงมาพร้อมกับปล่อยก๊าซไนโตรเจนพร้อมกันด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมจนทำให้สารละลายฟุ้งกระจายและตกลงบนกระจกสไลด์ โดยอัตราเร็วของก๊าซเท่ากับ 0.69 kg/cm^2 และอัตราไหลของสารละลายเท่ากับ 0.25 ml/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1 – 6 โดยเปลี่ยนปริมาณของ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ในตาราง 3.1
8. นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาพื้นที่ผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
9. นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(X-rays diffraction)
10. นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ด้วยเครื่อง UV-visible แบบ Double Beam
11. นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่น(sheet resistance) ด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น
12. นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ของฮอลล์(Hall effect)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

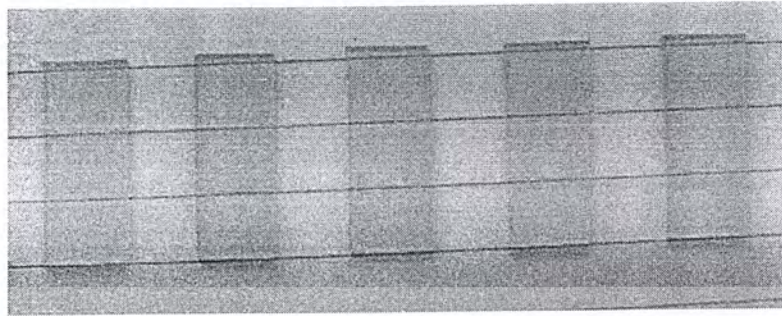
จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ โดยวิธี สเปรย์ไพโรไลซิส พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้จะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ได้ดี มีสีขาวใสจนถึงน้ำตาลอ่อนๆ และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนา 400 – 600 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.5



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เตรียมได้

รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย F =10% ที่เตรียมได้

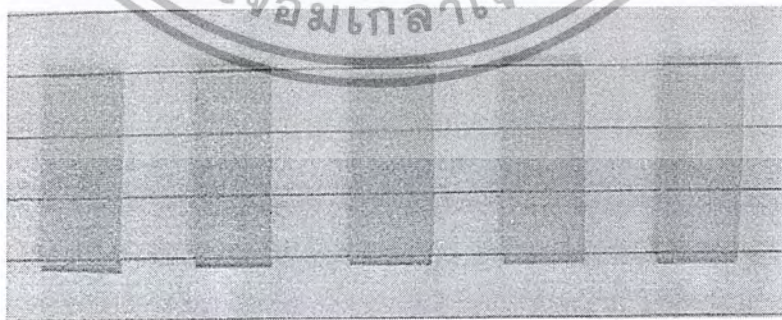
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย F =20% ที่เตรียมได้



รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย F =30% ที่เตรียมได้

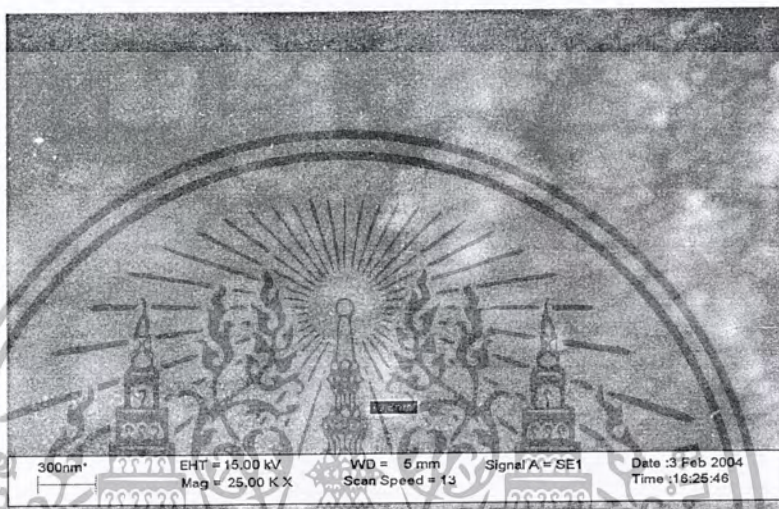


รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง SnO_2 ที่เจือด้วย F =40% ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

จากการศึกษาภาพถ่ายพื้นที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455 Vp ของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบว่าเม็ดเกรนของเนื้อฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน 20% มีขนาดสม่ำเสมอ โดยมีขนาด 70-100 นาโนเมตร ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เจือด้วย F=20%

4.3 ผลการศึกษาการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnO₂ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับฟิสิกมาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด พิจารณารูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง SnO₂ และ ฟิล์มบาง SnO₂:F ที่ %F ต่างๆ ปรากฏว่าฟิล์มบาง SnO₂ และ ฟิล์มบาง SnO₂:F ที่เตรียมด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสนี้ มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนัล รูไทล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [8-13] และมีระนาบที่เด่นชัดคือ ระนาบ (200) และ (110) โดยเมื่อมีการเจือฟลูออไรด์มากขึ้นจะทำให้ระนาบ (200) มีความคมชัดมากขึ้น และ ระนาบ (110) มีความคมชัดลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเจือฟลูออรีนในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มบางมีการจัดตัวในแนวระนาบ (200) มากขึ้น ทำให้เกรนของฟิล์มมีการเป็นผลึกมากขึ้น โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการวัดค่า FWHM ไปคำนวณหาขนาดเกรนด้วยสูตร $d = \frac{\lambda}{D \cos \Theta}$

เมื่อ

d คือ ขนาดเกรน

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

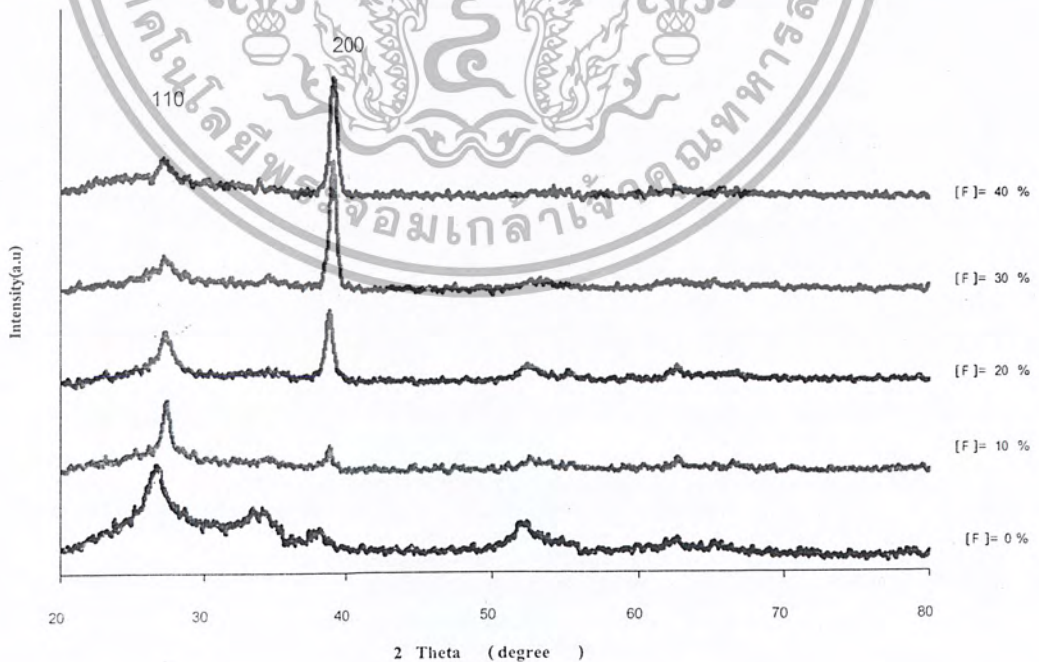
Θ คือ มุมที่พีคของสเปกตรัม

D คือ ความกว้างของพีคที่มีค่าความเข้มครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (FWHM)

พบว่าเกรนมีขนาดลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้นดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

สารตัวอย่าง	ขนาดเกรน(10^{-9} เมตร)
SnO_2	83
$\text{SnO}_2:\text{F}$ ([F/Sn]=10%)	54
$\text{SnO}_2:\text{F}$ ([F/Sn]=20%)	17
$\text{SnO}_2:\text{F}$ ([F/Sn]=30%)	17
$\text{SnO}_2:\text{F}$ ([F/Sn]=40%)	16

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ ความเข้มข้นต่างๆ



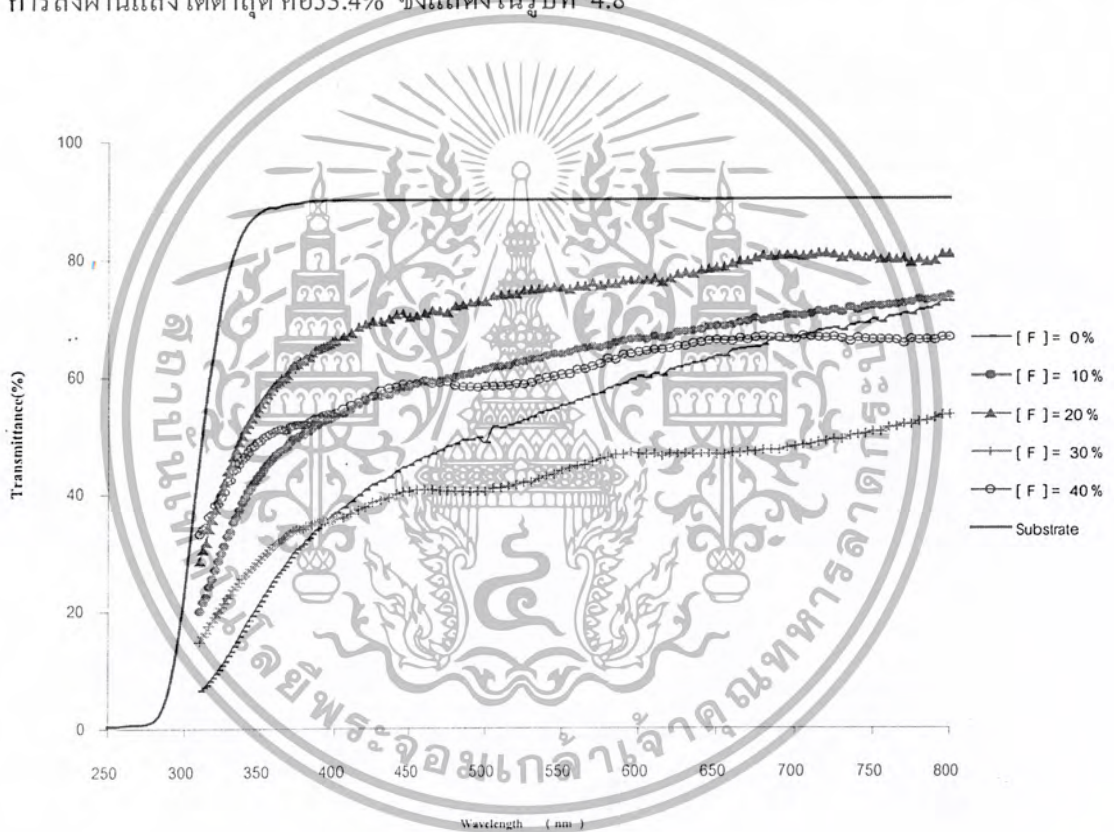
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์และฟิล์มบางดีบุก

ออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ซีห้อ จัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกความยาวคลื่นในช่วง 300-800 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆนั้น แสงที่มีความยาวคลื่น มากกว่า 310 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านได้ และพบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ $\text{F}=20\%$ มีการส่งผ่านแสงได้สูงสุดที่ 80.8% และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ 30% มีการส่งผ่านแสงได้ต่ำสุด คือ 53.4% ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

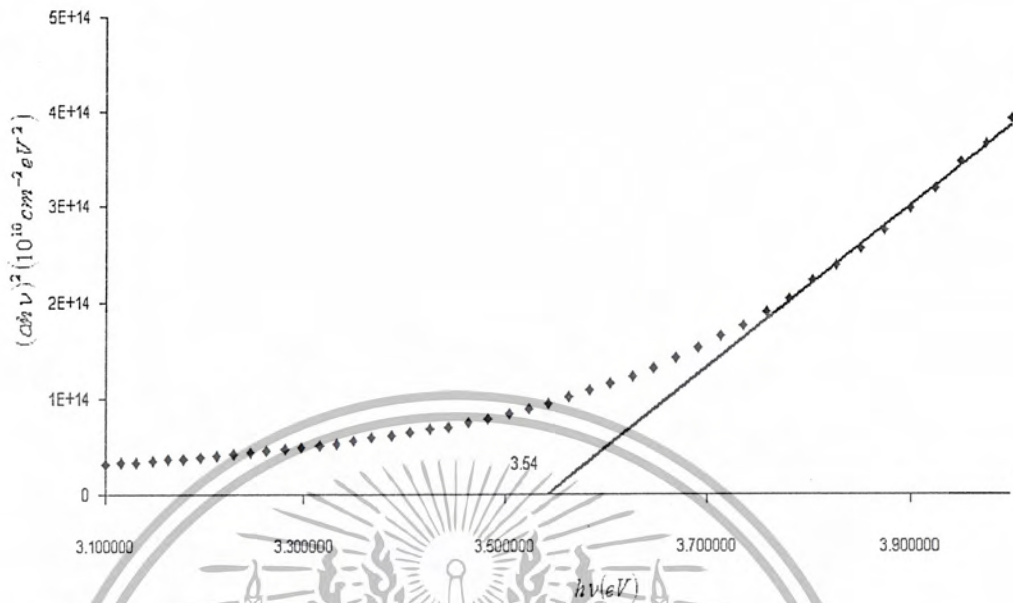
จากนั้นนำข้อมูลกราฟส่งผ่านแสงที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดัง
สมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{T}\right)$$

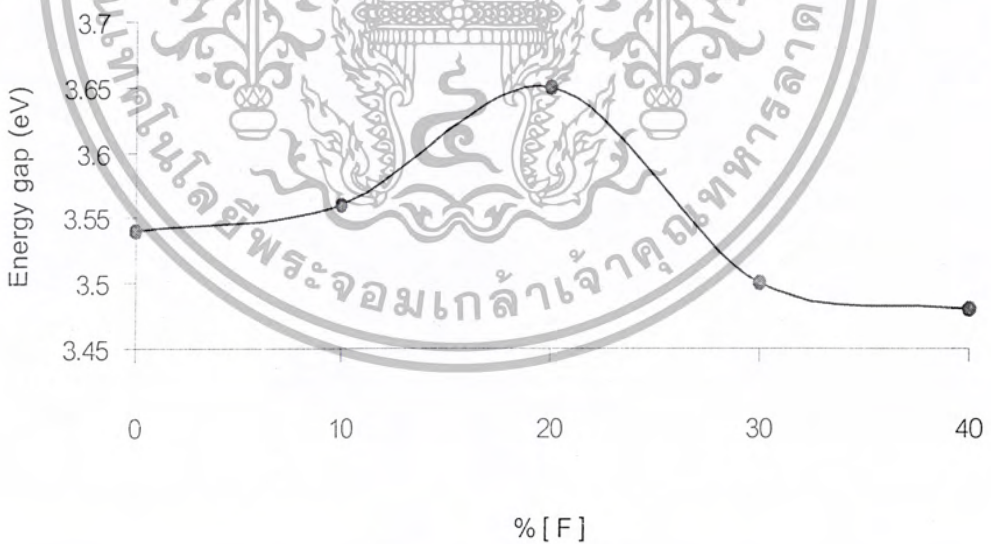
โดย d คือ ความหนาของฟิล์ม

T คือ เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์ม

แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพลังงานโฟตอน ($\alpha h\nu$)² กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) พบว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่เตรียมได้ทั้งหมด จะแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นการแสดงว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่เท่ากับหรือมากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานและอยู่ในสภาพถูกกระตุ้น จึงมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแบบ ไม่มีกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการแสดงว่าฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ทั้งหมดที่เตรียมได้มีลักษณะ โครงสร้างพลังงานแบบตรง และสามารถหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap: E_g) ได้จากการลากเส้นตรงต่อส่วนที่แสดงกราฟแบบเชิงเส้นไปตัดแกนพลังงานโฟตอน โดยจุดตัดกราฟที่ได้ก็คือ ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO_2 ที่ไม่มีสารเจือ F จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.54 eV และจากผลการทดลอง เมื่อเราเจือ F ลงไปในฟิล์มบาง SnO_2 ในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ (Sn/F โดยน้ำหนัก) ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อเจือ F ที่ความเข้มข้น 20% จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ F มากกว่า 20% ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าลดลงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว[13]



รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) จากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง SnO_2 ที่ไม่มีการเจือ F



รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $SnO_2:F$ ที่ %F ต่างๆ

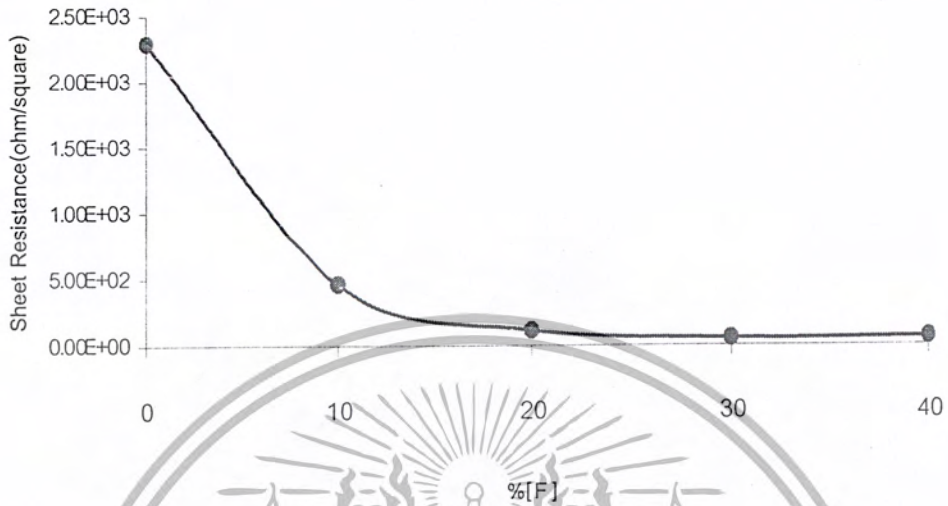
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAMPLE	Energy gap (eV)
glass	-
SnO ₂	3.54
SnO ₂ :F ([F]=10%)	3.56
SnO ₂ :F ([F]=20%)	3.65
SnO ₂ :F ([F]=30%)	3.50
SnO ₂ :F ([F]=40%)	3.48

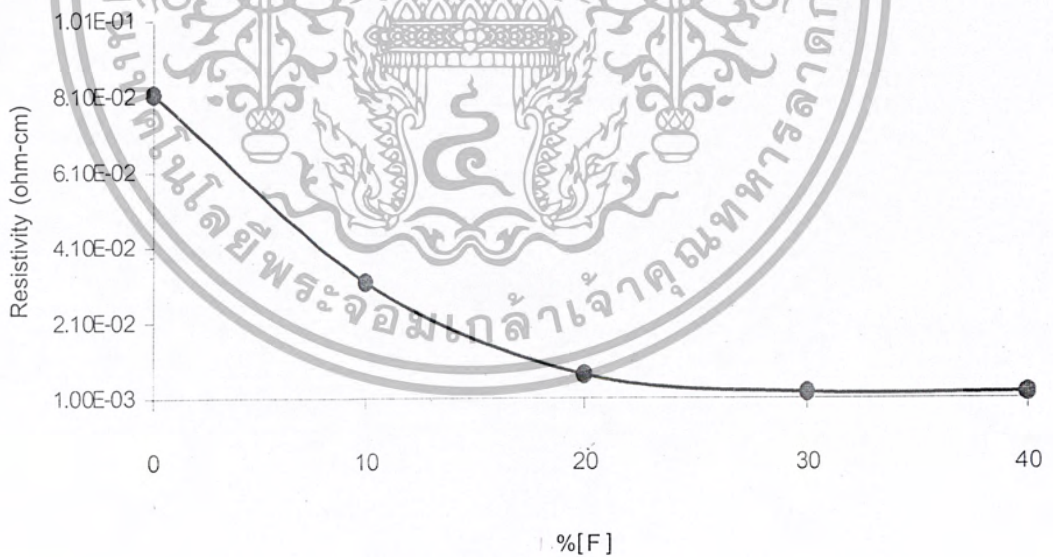
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnO₂ และฟิล์มบาง SnO₂:F ที่ %F ต่างๆ

4.5 ผลการศึกษาค่าความต้านทาน

จากผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO₂) และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (SnO₂:F) ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw Method) พบว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ มีความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดคือ 2.2×10^3 (Ω -square) และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 8.17×10^2 (Ω -cm) เมื่อมีการเจือด้วยฟลูออไรด์ ปรากฏว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง และฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีนที่ความเข้มข้น 30% จะมีค่าความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดคือ 54.1 (Ω -square) และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 2.59×10^{-3} (Ω -cm) หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือมากกว่า 30% พบว่าค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11-4.12 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ



รูปที่ 4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ

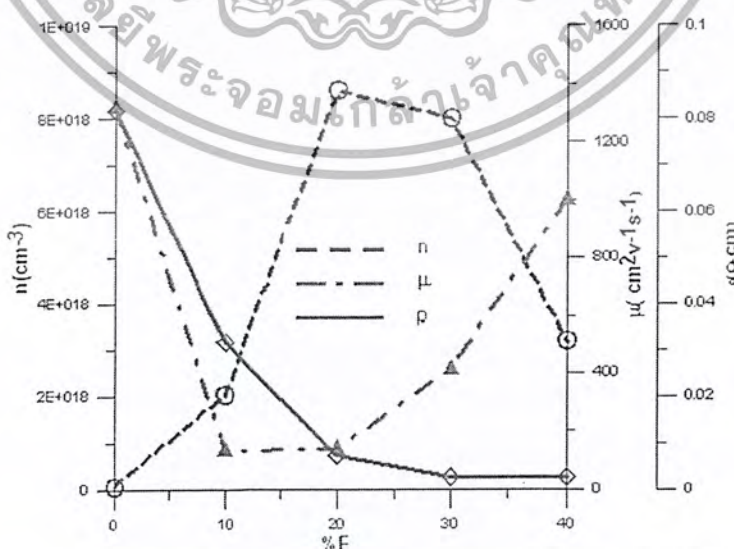
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% [F/Sn]	ค่าความต้านทานแผ่น (Ω -square)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า(Ω -cm)
0	2.29×10^3	8.17×10^{-2}
10	4.61×10^2	3.17×10^{-2}
20	1.16×10^2	7.28×10^{-3}
30	5.41×10^1	2.59×10^{-3}
40	6.08×10^1	2.67×10^{-3}

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ

4.6 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

จากการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์สามารถหา ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะได้ โดยพบว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียม ได้มีค่าความหนาแน่นของพาหะ $7.92 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และเมื่อเจือฟลูออรีน (10%, 20%) ค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อเจือฟลูออรีน 30% และ 40% ส่วนสภาพคล่องของพาหะเมื่อความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นค่าสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าลดลง ซึ่ง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

SnO_2 และฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$ ที่ %F ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% [F]	N (cm ⁻³)	μ (cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	ρ (Ω -cm)
0	7.92×10^{16}	1.32×10^3	8.17×10^{-2}
10	2.02×10^{18}	1.34×10^2	3.17×10^{-2}
20	8.59×10^{18}	1.39×10^2	7.28×10^{-3}
30	8.00×10^{18}	4.13×10^2	2.59×10^{-3}
40	3.21×10^{18}	1.00×10^3	2.67×10^{-3}

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง SnO₂ และฟิล์มบาง SnO₂:F ที่ %F ต่างๆ



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสสัณฐานลักษณะของฟิล์มที่ได้ยึดเกาะกับฐานรองได้ดี จากการศึกษาด้วย การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าโครงสร้างของฟิล์มที่เตรียมได้จะเป็นแบบเตตระโกนอล รูปร่างและมีความเป็นเนื้อเดียวกันและยังพบว่าเกรนมีขนาดลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเจือมากขึ้นโดยพบว่าเกรนมีขนาดอยู่ในช่วง 16-84 นาโนเมตร เมื่อเจือฟลูออรีน (10%, 20%, 30%) จะส่งผลให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง โดยที่ 30% มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด คือ $2.59 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ส่วนเมื่อเจือฟลูออรีน 40% ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจืออะตอมฟลูออรีนจะเข้าไปแทนที่อะตอมของออกซิเจนทำให้อิเล็กตรอนเกินมา 1 ตัวซึ่งอิเล็กตรอนตัวนี้จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ [3] และเมื่อนำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ไปศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่า ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 20% สามารถส่งผ่านแสงได้มากที่สุดคือ 80.8% และสามารถหาช่องว่างแถบพลังงานได้ โดยพบว่าเมื่อเจือฟลูออรีน (10%, 20%) จะทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ และลดลงเมื่อเจือฟลูออรีน (30%, 40%) ตามลำดับ [13] จากศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์ พบว่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือฟลูออรีนในปริมาณมากขึ้น อยู่ในช่วง 10^{17} - 10^{19} cm^{-3} และค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาทั้งหมดสรุปได้ว่าการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 20 % เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 20 % มีการส่งผ่านแสงได้มากที่สุดคือ 80.8% และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $7.28 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ถึงแม้ว่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 30 % จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด คือ $2.59 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ แต่ค่าฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 30 % ได้ต่ำสุดคือ 53.4%

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางคิบูคอกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- 1.คุณภาพของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับอัตราการพ่นของสารละลายโดยหากใช้อัตราพ่นเร็วเกินไปจะทำให้เนื้อฟิล์มไม่สม่ำเสมอ
- 2.ในการเตรียมสารละลายตั้งต้น หากทิ้งไว้เป็นเวลานานจะทำให้เกิดการตกตะกอนได้
- 3.อุณหภูมิของฮีตเตอร์ ในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส หากใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มดีขึ้น (ในการทดลองใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส)
- 4.ควรมีการนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการแอลนิตเพื่อเพิ่มความเป็นผลึกของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- คูสิต เครื่องาม , เซลล์แสงอาทิตย์ , “สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์” , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542 , หน้า 589-590
- Fantini,M. and Torriani, J. , “ The compositional and structural properties of sprayed SnO₂:F thin films” , Thin Solid Films 138 , (1986) : 255-265
- Kittel, C. 1971. in Introduction to Solid State Physics , 4th ed., pp.4-32 , 46-48 , 56-60 , 364-365 , 611-612 , 662-663 , John Wilen&Sons Inc., New York.
- งามนิคย์ แก้วแดง , จิตินัย แก้วแดง , ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ , “การเตรียมฟิล์มบางและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Abelas, F. 1972. in Opertic Properties of Solids, pp.23-40, North-Holland, London.
- Runyan, W.R. 1975. in Semiconductor Measurement and Instrumentation, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombarly, New York.
- อารีย์ วิเชียรฉาย, “เครื่องมือการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ”, หนังสือประกอบการสอนภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
- Acosta ,D.R. , Estrada, W., Castanedo, R. , Maldonado, A. , Valenzuela, M.A. , “Strutural and surface studies of tin oxide films doped with fluorine”, Thin Solid Film 375 (1998) 147-150
- Wu Yuanda, Tong Maosong, He Xiuli, Zhang Yushu, Dai Guorui., “ Thin film sensors of SnO₂-CuO-SnO₂ sandwich Structure to H₂S” , Sensors and Actuators B 79(2001)187-191.
- Thangaraju, B., “Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films SnCl₂ precursor” , Thin Solid Films 402(2002) 71-78.
- Korotcenkov ,G. , Brinzari ,V. , Schwank, J. , Dibattista ,M. , Vasiliev ,A. , “Peculiarities of SnO₂ thin film deposition by spray pyrolysis for gas sensor application” , Sensors and Actuators B77 (2001) 244-252.
- Acosta, D.R. , Zironi ,E.P. , Montoya, E. , Estrada ,W. , “About the structural, optical and electrical properties of SnO₂ films produced by spray pyrolysis from solutions with low and high contents of fluorine” , Thin Solid Films 288(1996) 1-7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Leite, Edson R. , Ines, M. , Bernardi, B. , Longgo Elson. , Varela, Jose A. , Paskocimas, Carlos A. ,
“ Enhanced electrical property of nanostructured Sb-doped SnO₂ thin film processed by soft
chemical method”, Thin Solid Films 449(2004):67-72.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21-1250		Wavelength = 1.54056				
CuKα		2θ	Intensity	h	k	l
TiO Oxide		28.575	100	1	1	0
		33.875	41	1	0	1
		37.949	24	2	0	0
		39.975	5	1	1	1
		42.611	2	2	1	0
		51.751	63	2	1	1
		54.757	17	2	2	0
		57.234	2	0	0	2
		51.229	13	3	1	0
		54.757	17	1	1	2
		55.263	15	3	0	1
		71.276	7	2	0	2
		78.888	11	3	2	1
		81.170	3	4	0	0
		83.658	5	2	2	2
		87.186	3	3	3	0
		89.721	3	3	1	2
		92.838	3	4	1	1
		95.322	3	4	2	0
		95.023	4	1	0	3
		108.269	8	4	0	2
		112.005	3	5	1	0
		114.806	3	3	3	2
		116.040	8	4	3	1
		121.720	7	3	0	3
		121.837	6			
		130.556	6	5	2	1
		133.775	1	4	4	0
		137.634	4	3	2	3
		142.997	2	5	3	0
		147.370	6	5	1	2

CuKα		2θ	Intensity	h	k	l
CuKα		2	100	1	1	0
Filter: Ni		Beta	d-sp:			
Cut-off: 10L Diffraction		1/less:				
Ref: Swenson, <i>Tolpe, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 1, 54 (1953)</i>						
Spec: Tetragonal		S.G.: P4g/mmm (136)				
a: 4.735	b:	c: 3.188	A:	B:	C:	0.0729
α:	β:	γ:	Z: 2	mp:		
Ref: <i>Ibid.</i>						
Dx: 5.981		Dm: 7.021	ZS/PC: P3g - 20(0.091, 49)			
α:	η ₀₁ : 2.006	γ: 2.0972	Sign: + 2V:			
Ref: Winchell, A., Winchell, H., <i>Microscopic Character of Artificial Inorg. Solid Sub., 62 (1964)</i>						
Color: White						
Sample from Johnson, Matthey Co., Ltd. Their spectroscopic analysis showed no impurities greater than faint trace. X-ray pattern taken at 26 C. Optical data on specimen from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 1555. Opaque mineral optical data on specimen from Mwirasando mine, Uganda. RIR% = 11.5-12.4. Disp. = Std., VHM100 = 1168-1332. Ref: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. 02 Ti Type: Rutile group, rutile subgroup. Also called: Lin stone. PSC: U'6. To replace 1-657. Deleted by 41-1445, lower Fn. Bayliss, 8/90. Mwt: 150.69. Volume [CD]: 71.57.						

© 1999 JCPDS - International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
PCPDFWIN v. 2.02



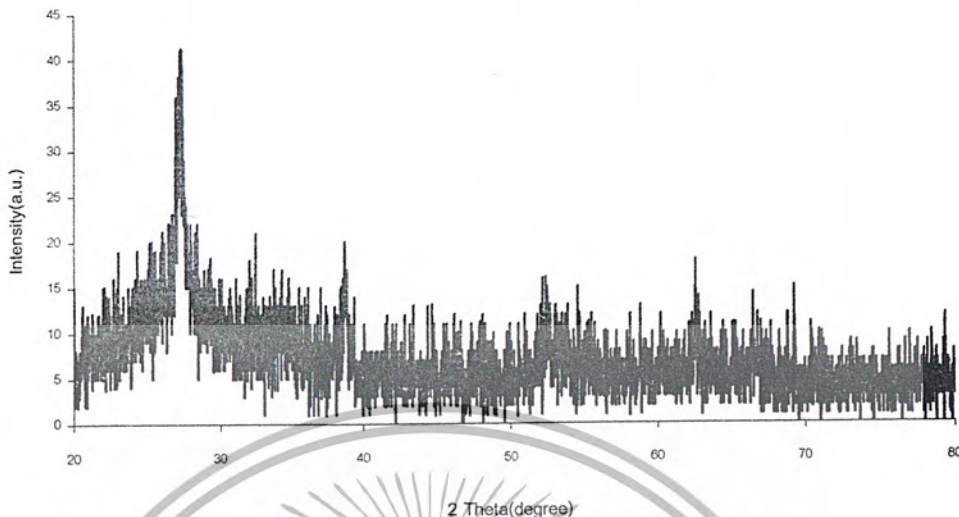
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

85-0712		Wavelength= 1.54060						C					
SnO		2	int	h	k	l	2	int	h	k	l		
Tin Oxide		18.408	60	0	0	1	89.046	16	1	1	4		
		29.948	999*	1	0	1							
		33.354	266	1	1	0							
		37.313	92	0	0	2							
		38.360	1	1	1	1							
		44.522	9	1	0	2							
Rad.: CuKα1 λ: 1.54060 Filter: d-sp: Calculated		47.889	142	2	0	0							
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/cor.: 14.90		50.904	219	1	1	2							
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)		51.727	8	2	0	1							
Ref: Moore, W.J., Pauling, L. J. Am. Chem. Soc., 63, 1392 (1941)		57.517	229	2	1	1							
Sys.: Tetragonal S.G.: P4/nmm (129)		62.231	66	2	0	2							
a: 3.796(6) b: c: 4.816(8) A: C: 1.2687		62.797	77	1	0	3							
α: β: γ: Z: 2 mp.		67.446	4	2	1	2							
Ref: Ibid.		67.988	9	1	1	3							
Dx: 6.446 Dm: ICSD #: 026597		70.053	33	2	2	0							
Peak height intensity. R-factor: 0.230. PSC: IP4. Mwt: 134.69. Volume[CD]: 69.40.		73.143	2	2	2	1							
		78.017	36	3	0	1							
		79.551	10	0	0	4							
		79.838	29	3	1	0							
		82.156	24	2	2	2							
		82.662	55	2	1	3							
		84.318	3	1	0	4							
		86.897	1	3	0	2							

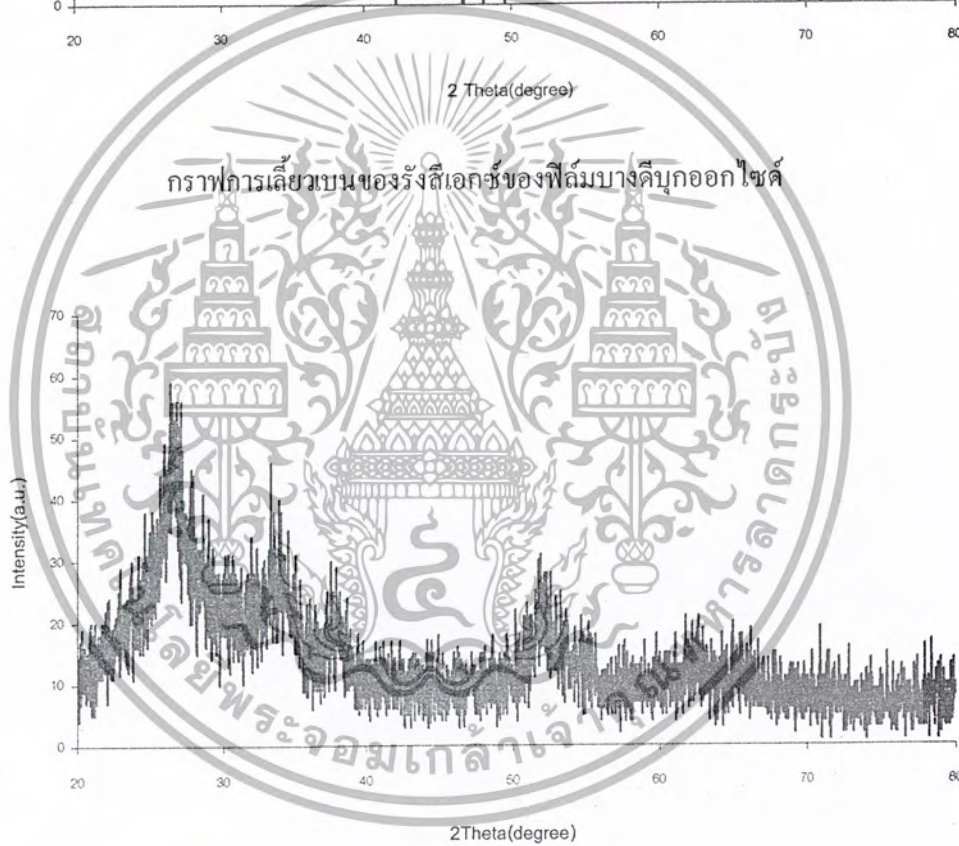
© 1999 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
PCPDFWIN v. 2.02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

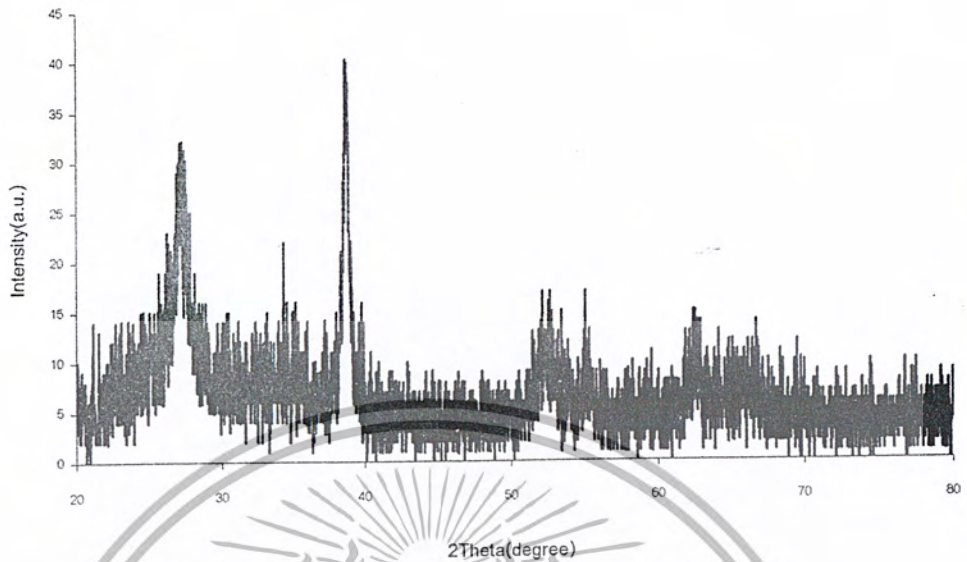


กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางคีนุกออกไซด์

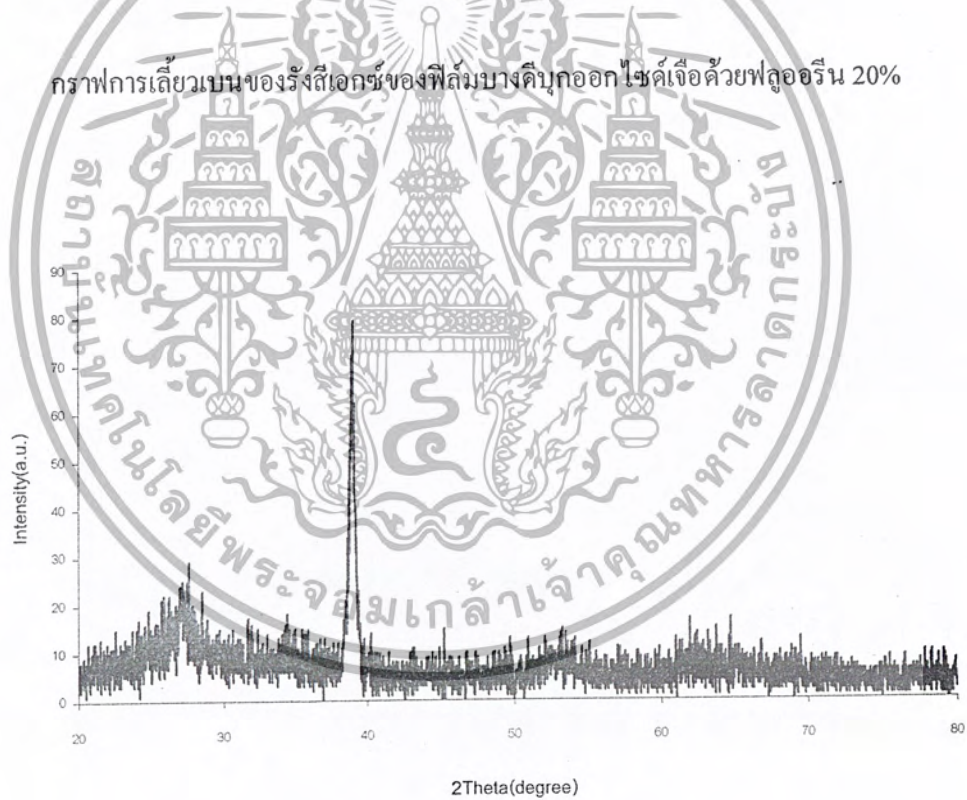


กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางคีนุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

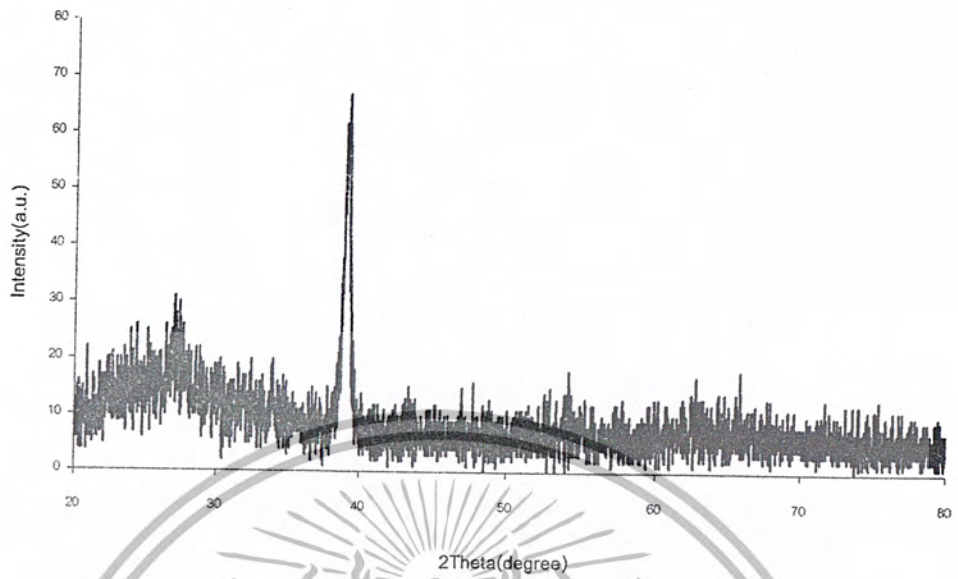


กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางคีนุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน 20%



กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางคีนุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน 40%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายบุญประเสริฐ เงินแท่ง เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2523 เป็นคน
 ประจวบคีรีขันธ์โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียนประจวบ
 วิทยาลัย และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์
 ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการ
 ศึกษา 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้