

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกผลึกและการวิเคราะห์ดีบุกออกไซด์

Growth and Characterization of Tin Oxide Thin Films



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกผลึกและการวิเคราะห์ดีบุกออกไซด์  
Growth and Characterization of Tin Oxide Thin Films



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ดีบุกออกไซด์ : การปลูกผลึกและการวิเคราะห์

Tin Oxide Thin Film : Growth and Characterization

ผู้จัดทำ

นาย ธงชัย จันทรงาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การปลูกผลึกและการวิเคราะห์ดีบุกออกไซด์

## Growth and Characterization of Tin Oxide Thin Films

นายธงชัย จันทร์งาม รหัส 46015218

ดร.สุธีชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

ในโครงการนี้เป็นการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) โดยใช้หมอกของสารละลาย  $\text{SnCl}_4$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  เคลือบลงบนแผ่นกระจก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิของฐานรองและอัตราส่วนสารละลายของฟลูออรีน ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ในสารละลายที่มีต่อคุณภาพของฟิล์ม เพื่อให้ได้ฟิล์มดีบุกออกไซด์ ที่มีความส่องผ่านของแสงสูง และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ นอกจากนี้ในโครงการนี้ยังได้ออกแบบและพัฒนาระบบการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Growth and Characterization of Tin Oxide Thin Films

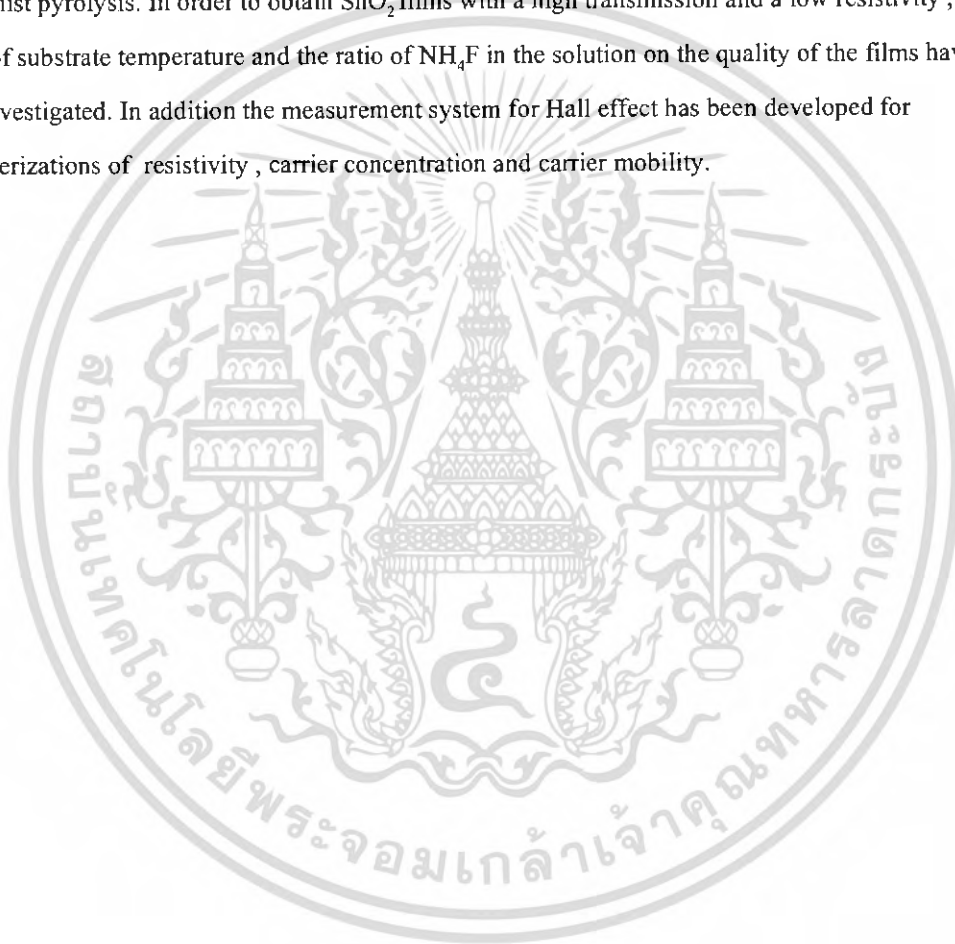
Mr. Thongchai Channgam ID 46015218

Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Academic 2005

### ABSTRACT

In this project, SnO<sub>2</sub> thin films doped with fluorine have been deposited on glass substrates using mist pyrolysis. In order to obtain SnO<sub>2</sub> films with a high transmission and a low resistivity, the effect of substrate temperature and the ratio of NH<sub>4</sub>F in the solution on the quality of the films have been investigated. In addition the measurement system for Hall effect has been developed for characterizations of resistivity, carrier concentration and carrier mobility.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 รายละเอียดโดยย่อของโครงการ	1
1.1.1 ปรัชญาการณของฮอลล์ (Hall Effect)	1
1.1.2 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.2 ทฤษฎีและหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	5
2.3 เทคนิคการวัดของ van der pauw	8
2.3.1 การวัดสภาพต้านทานและการวัดฮอลล์	12
2.3.2 คำนิยามสำหรับการวัดสภาพต้านทาน	12
2.3.3 การวัดสภาพต้านทาน	13
2.3.4 การคำนวณสภาพต้านทาน	14
2.3.5 คำนิยามสำหรับการวัดฮอลล์	14
2.3.6 ขั้นตอนพื้นฐานของการวัดฮอลล์	14
2.3.7 การคำนวณฮอลล์	15
2.3.8 การแก้สมการของ van der Pauw	16
2.5 ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )	16
2.5.1 ชนิดของ Transparent Conducting Oxides (TCOs)	18
2.5.2 การสร้าง Transparent Conducting Oxides (TCOs)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.3 คุณสมบัติของฟิล์ม TCOs ที่พิจารณา	21
2.5.4 ตัวอย่างการใช้งานกับการเลือกใช้ชนิด TCOs	27
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	32
3.1 วิธีการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้เทคนิค van der pauw	32
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม	32
3.1.2 วิธีการทดลอง โดยใช้กาวเงินติดขั้วแผ่น sample	36
3.1.3 ทดลอง โดยใช้โพรบ	37
3.1.4 วิธีการทดลอง โดยเปลี่ยนตำแหน่งแผ่น sample	37
3.2 การเตรียมฟิล์มบางคีนอกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ )	39
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2$	39
3.2.2 เงื่อนไขที่ทำการทดลอง	39
3.2.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2$	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	41
4.1 ผลการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้เทคนิค van der pauw	41
4.1.1 ผลการทดลอง แบบใช้กาวเงิน (Ag-paste)	41
4.1.2 ผลการทดลอง แบบใช้โพรบ (probe)	41
4.1.3 ผลการทดลอง แบบไม่ได้ shield ด้วย Aluminium foil	43
4.2 ผลการทดลองฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$	45
4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	45
4.2.2 ผลการศึกษาพื้นผิว	45
4.2.3 ผลการศึกษากการส่งผ่านแสง	47
4.2.4 ผลการศึกษาคงสมบัติทางไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์	49
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	55
เอกสารอ้างอิง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

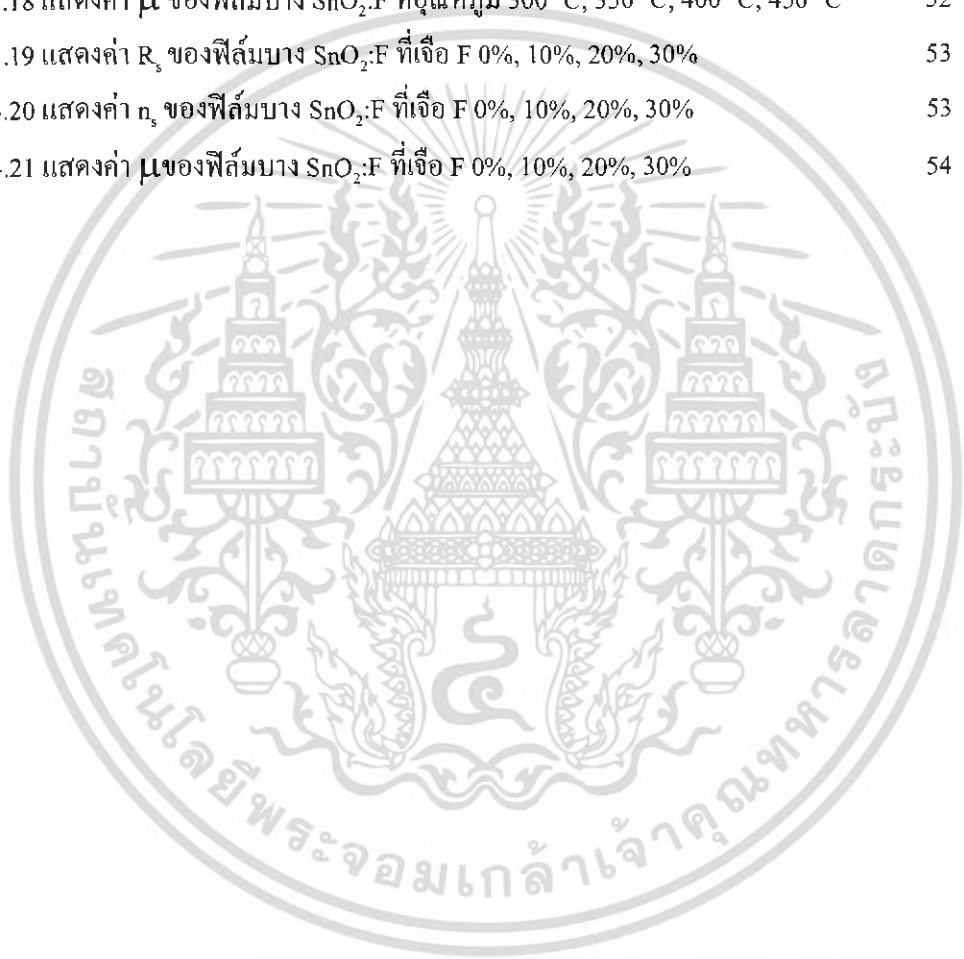
## สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 ปรัชญาการณของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	6
รูปที่ 2.2 ปรัชญาการณของฮอลล์	9
รูปที่ 2.3 การวัดความต้านทาน โดยเทคนิค van der pauw	10
รูปที่ 2.4 การวัดแรงดันฮอลล์โดยใช้เทคนิค van der pauw	11
รูปที่ 2.5 รูปทรงแบบต่างๆ ของเทคนิค van der pauw	12
รูปที่ 2.6 แนวโน้มการใช้งาน TCOs	18
รูปที่ 2.7 คุณสมบัติของสารประกอบแบบ ternary compound ของ TCOs	19
รูปที่ 2.8 Electrochromic Mirrors and Windows	29
รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการทดลอง	21
รูปที่ 3.2 แบบใช้กาวเงินติดที่ขั้วแผ่น sample	21
รูปที่ 3.3 แบบใช้โพรบ	22
รูปที่ 3.4 กล่องใส่แม่เหล็กที่ shield ด้วย Aluminium foil	22
รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมและโปรแกรม Labview ที่สร้างขึ้นมาในการวัดฮอลล์	23
รูปที่ 3.6 การคำนวณโดยใช้ Excel	25
รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub>	26
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า R <sub>s</sub> แบบใช้กาวเงินกับโพรบ	42
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า n <sub>s</sub> แบบใช้กาวเงินกับโพรบ	42
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า μ แบบใช้กาวเงินกับโพรบ	42
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า R <sub>s</sub> แบบ shield กับที่ไม่ได้ shield	43
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า n <sub>s</sub> แบบ shield กับที่ไม่ได้ shield	44
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า μ แบบ shield กับที่ไม่ได้ shield	44
รูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C	45
รูปที่ 4.8 ฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่เจือ F ในความเข้มข้น 0%, 10%, 20%, 30%	45
รูปที่ 4.9 รูปพื้นผิวของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิ 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C	46
รูปที่ 4.10 รูปพื้นผิวของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%	47
รูปที่ 4.11 เปรอ์เซินการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	48
รูปที่ 4.12 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E <sub>g</sub> ) ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	48
รูปที่ 4.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E <sub>g</sub> ) ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 4.14 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่ %F ต่างๆ	50
รูปที่ 4.15 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
รูปที่ 4.16 แสดงค่า R <sub>s</sub> ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C	51
รูปที่ 4.17 แสดงค่า n <sub>s</sub> ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C	52
รูปที่ 4.18 แสดงค่า μ ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C	52
รูปที่ 4.19 แสดงค่า R <sub>s</sub> ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%	53
รูปที่ 4.20 แสดงค่า n <sub>s</sub> ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%	53
รูปที่ 4.21 แสดงค่า μ ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO เปลี่ยนไปตามชนิดสารที่เจือ	18
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบแบบ ternary compound ของ TCOs	20
ตารางที่ 2.3 วิธีการสร้างที่ใช้กับสารชนิดต่างๆ	21
ตารางที่ 2.4 figure of merit ของ TCOs บางชนิด	22
ตารางที่ 2.5 สภาพต้านทานไฟฟ้าของ TCOs บางชนิด	22
ตารางที่ 2.6 ค่า work function	23
ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิที่ทนได้ก่อนความต้านทานเปลี่ยน	24
ตารางที่ 2.8 สารเคมีในการกัดลาย	25
ตารางที่ 2.9 ความคงทนต่อสภาพทางกลต่างๆของผลึก TCOs	26
ตารางที่ 2.10 TCOs ที่เหมาะสมกับอุปกรณ์หรือการใช้งานแต่ละประเภท	27
ตารางที่ 3.1 วัดแรงดัน โดยยังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก	23
ตารางที่ 3.2 การวัดแรงดันฮอลล์ สนามแม่เหล็กอยู่ในทิศ +z	23
ตารางที่ 3.3 การวัดแรงดันฮอลล์ สนามแม่เหล็กอยู่ในทิศ -z	24
ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	40
ตารางที่ 4.1 ค่า (R <sub>s</sub> , n <sub>s</sub> , μ) แบบใช้ควาเงิน (Ag-plate)	41
ตารางที่ 4.2 ค่า (R <sub>s</sub> , n <sub>s</sub> , μ) แบบใช้โพรบ	41
ตารางที่ 4.3 ค่า (R <sub>s</sub> , n <sub>s</sub> , μ) แบบไม่ได้ shield ด้วย Aluminum foil	43
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E <sub>g</sub> ) ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	50
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า R <sub>s</sub> , n <sub>s</sub> , μ ของฟิล์มบาง SnO <sub>2</sub> :F	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 รายละเอียดโดยย่อของโครงการ

การวัดและการหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ชนิดของพาหะ, ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล, สภาพคล่องของพาหะ, ความกว้างของช่องว่างพลังงาน, อายุของพาหะ และสภาพต้านทานของสารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นๆ มีความสมบูรณ์หรือไม่ และมีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานประเภทใด การวัดมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีวัดด้วยเข็มร้อน(Hot point probe measurement), การวัดด้วยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ(Four poin probe), ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) และการทดลองของเฮย์ และช็อคเลย์ (Haynes – Shockley experiment)

ฟิล์มออกไซด์ตัวนำโปร่งแสง (Transparent conducting oxide : TCO) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conducting electrode) ที่จำเป็นสำหรับการผลิตอุปกรณ์ออพโตอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) และอุปกรณ์แสดงผลทั้งหลาย เนื่องจากมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ต่ำ และสามารถให้แสงผ่านได้สูง ในกลุ่มของ TCO ที่รู้จักกันดี คือ  $\text{SnO}_2$  ที่เจือด้วยฟลูออรีน (F-doped  $\text{SnO}_2$ ), ITO (Indium Tin Oxide) และ ZnO ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม (Al-doped ZnO)

เนื้อหาของโครงการนี้ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

- การวัดและการหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ โดยใช้ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)
- การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

#### 1.1.1 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

เป็นการวัดและหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปรากฏการณ์ของฮอลล์นี้ ใช้วัดหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาก โดยเมื่อนำแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและ

สนามแม่เหล็ก ซึ่งในโครงการนี้ใช้เทคนิคของ van der pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1.2 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์

โดยปกติฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่ไม่เจือปนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นมีความส่องผ่านของแสงสูง เนื่องจากช่องว่างพลังงานที่กว้างแต่มีความต้านทานไฟฟ้าไม่ต่ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องเจือด้วยอะตอมของสารอื่นๆเพื่อให้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conducting electrode) ที่มีความส่องผ่านของแสงสูงและความต้านทานไฟฟ้าต่ำ และเป็นส่วนสำคัญของ thin-film solar cell ซึ่งในโครงการนี้เป็นการการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) โดยใช้หมอกของสารละลาย  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  เคลือบลงแผ่นกระจก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิของฐานรอง และอัตราส่วนสารละลายของฟลูออรีน ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ที่มีต่อคุณภาพของฟิล์มที่ได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ โดยใช้เทคนิคของ van der pauw
- เพื่อศึกษาการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ, ของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยใช้เทคนิคของ van der pauw
- เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  โดยใช้หมอกของสารละลาย  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$
- เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์ม  $\text{SnO}_2$  ที่เงื่อนไขต่างๆ
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในโครงการนี้จะศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ และคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยใช้เทคนิคของ van der pauw และทำการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) โดยใช้หมอกของสารละลาย  $\text{SnCl}_2$  และ  $\text{NH}_4\text{F}$  โดยศึกษาผลของอุณหภูมิของฐานรอง และอัตราส่วนสารละลายของฟลูออรีน ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) ที่มีต่อคุณภาพของฟิล์ม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้

- ทำให้ทราบถึงหลักการของปรากฏการณ์ของฮอลล์ด้วยเทคนิคของ van der pauw
- ทำให้ทราบถึงวิธีการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ, ของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ โดยใช้เทคนิคของ van der pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )
- ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในวิธีการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมนำไปประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของ thin-film solar cell



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการ

สารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนเราเรียกว่าสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) และเจอร์เมเนียม (Germanium) สารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอนและเจอร์เมเนียมนี้ ที่อุณหภูมิห้องจะมีแรงจับตัวกันระหว่างนิวเคลียส และอิเล็กตรอนค่อนข้างจะเหนียวแน่น จึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกกระทำก็ไม่มีการเสไฟฟ้าไหล จึงทำหน้าที่เช่นเดียวกับฉนวน แต่แรงจับตัวกันดังกล่าวไม่เหนียวแน่นเท่าฉนวน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น วาเลนซ์อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะหลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น อิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับในตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลจึงน้อย

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เช่น ซิลิกอน เจอร์เมเนียม เทลลูเรียม เป็นต้น สารดังกล่าวเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ คือมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นลำพังสารนี้อย่างเดียวแล้วไม่สามารถทำประโยชน์อะไรได้มากนัก ดังนั้น เพื่อที่จะให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากเราจึงต้องมีการปรุงแต่งโดยการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไปเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และไดโอดชนิดต่าง ๆ

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) ที่มีเฉพาะอะตอมของธาตุชนิดเดียว คือไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นปนอยู่เลย หรือปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม ซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด i (i-type) เช่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เช่น ซิลิกอน หรือเจอร์เมเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ในที่นี้จะขออธิบายโดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอน

### 1. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของฟอสฟอรัส (P) หรือสารหนู (As), พลวง (Sb), บิสมัท (Bi) ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในก้อนผลึกนั้นจึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

### 2. สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของโบรอน (B) หรือ อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In), แกลเลียม (Ga) ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในพันธะร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้

การวัดและการหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ชนิดของพาหะ, ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล, สภาพคล่องของพาหะ, ความกว้างของช่องว่างพลังงาน, อายุของพาหะ และสภาพต้านทานของสารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ นั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีวัดด้วยเข็มร้อน (Hot point probe measurement), การวัดด้วยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe), ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect), การทดลองของเฮย์ และช็อคเลย์ (Haynes - Shockley experiment) และการวัดจากคุณสมบัติความนำเนื่องจากแสง (Photo conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ

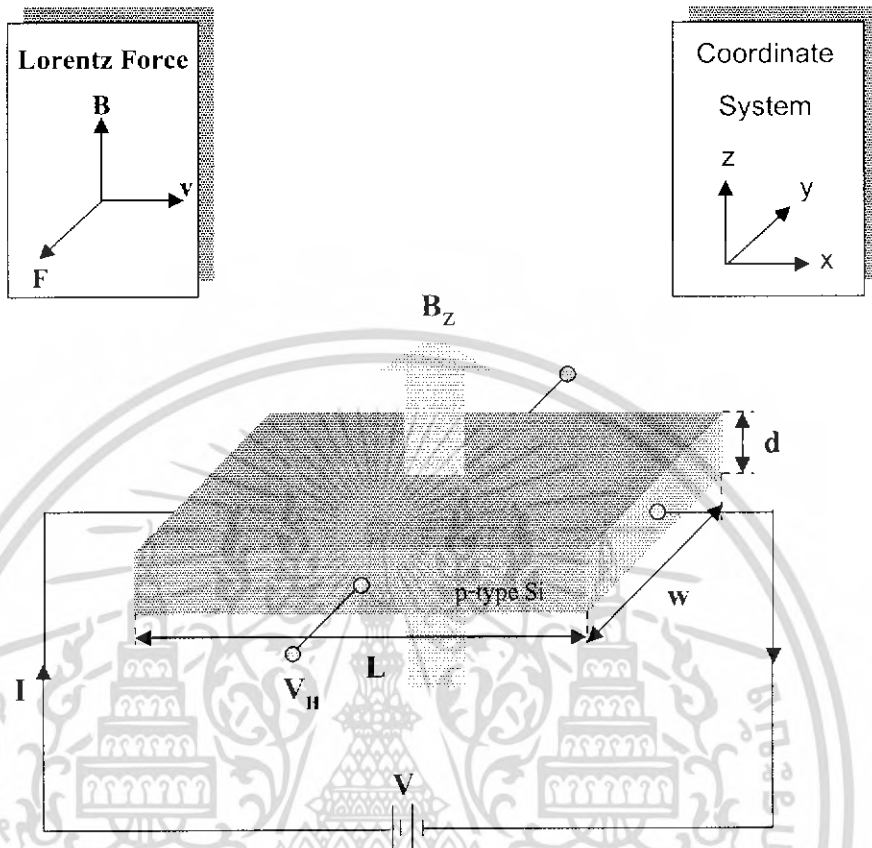
ซึ่งในโครงการนี้ ใช้วิธีปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาก

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) คือ ขณะที่กระแส  $J_x$  ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทางหนึ่ง (+x) เมื่อให้สนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศ z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแส  $J_x$  จะทำให้มีสนามไฟฟ้าด้านขวางเกิดขึ้น โดยมีทิศทาง y ซึ่งตั้งฉากกับทิศของกระแสและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ผลจากการทดลองนี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า ในสารกึ่งตัวนำมีพาหะนำประจุอยู่สองชนิดที่แตกต่างกันคือ อิเล็กตรอน (electron) และ โฮล (hole)

พิจารณาแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) แท่งหนึ่ง ยาว L กว้าง w หนา d ถูกนำไปต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันความต่างศักย์  $V_x$  โวลต์ ทำให้เกิดกระแส  $J_x$  ไหลในทิศ +x และให้สนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศ z โดยตั้งฉากกับทิศของกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ซึ่งโฮลที่เป็นพาหะส่วนมาก และมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกอยู่ภายในแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า  $E_x$  จะเกิดแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_x$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่าน โดยมีทิศตั้งฉากกับกระแส จะเกิดมีแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อโฮลโดย

$$F_L = qv \times B \tag{1}$$

ซึ่ง  $F_L$  คือแรงลอเรนซ์และมีขนาดเป็น

$$|F| = qv_x B_z \tag{2}$$

ทิศทางของแรงลอเรนซ์ คือ  $-y$  ดังนั้น จะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน  $-y$  และมาสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำด้านตรงข้ามจึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $E_y$  มีทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮล ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ ในภาวะสมดุลและ steady state ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปทิศทาง  $+x$  ได้ แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $qE_y$ ) มีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = q\mathcal{E}_y = F_L = qv_x B_z \quad (3)$$

หรือ 
$$q\mathcal{E}_y = qv_x B_z \quad (4)$$

จาก  $J_x = pqv_x$  หรือ  $v_x = \frac{J_x}{pq}$

เมื่อแทนค่า  $v_x$  ลงในสมการที่ (4) จะได้ว่า

$$\mathcal{E}_y = \frac{J_x B_z}{pq} \quad (5)$$

ดังนั้น 
$$\frac{\mathcal{E}_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H \quad (6)$$

โดย  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

จาก 
$$V_y = V_H = \mathcal{E}_y w \quad (7)$$

โดย  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ (Hall voltage) หรือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแทนค่า  $J_x = \frac{I}{wd}$  และ  $\mathcal{E}_y = \frac{V_H}{w}$  ลงในสมการที่ (6) จะทำให้ได้

$$R_H = \frac{V_H d}{IB_z} = \frac{1}{pq} \quad (8)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = p_o = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{qdV_H} \quad (9)$$

และ

สภาพต้านทานไฟฟ้า 
$$\rho = \frac{Rwd}{L} = \frac{Vwd}{I_x L} \quad (10)$$

โดย  $R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร

และ  $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_p = \frac{1}{\rho pq} = \frac{R_H}{\rho} \quad (11)$$

จากสมการที่ (9), (10) และ(11) จะเห็นว่าการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำคือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้

นอกจากนี้แล้วจากสมการ (11) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) และสภาพต้านทาน ( $\rho$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่อง ( $\mu_p$ ) และหาค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของพาหะ ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ ของสารกึ่งตัวนำ

ในทำนองเดียวกันในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) จะมีค่าเป็นลบ (-) คือ  $R_{H(\text{electron})} = \frac{-1}{nq}$  โดยเฉพาะแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารชนิดพี คือมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้น การวัดแรงดันฮอลล์ ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพีได้อีกด้วย

นอกจากนี้แล้ว ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมานี้ ไม่ได้มีการพิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะ หรือพาหะกับแลตทิส ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงไม่ถูกต้อง ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะจะได้ว่า

$$R_{H\text{ชนกัน}} = 1.18R_H \quad (12)$$

และ

$$\mu_{p\text{ชนกัน}} = 1.18\mu_p \quad (13)$$

อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์การวัดและปรากฏการณ์ของฮอลล์ จะให้ผลที่ถูกต้องโดยสมการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วสามารถใช้ได้ ก็เฉพาะกับสารตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิกที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น เนื่องจากสามารถพิจารณาได้ว่ามีพาหะเพียงชนิดเดียว แต่ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก หรือสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือเพียงเล็กน้อย จะมีผลของพาหะทั้งสองชนิดคือ อิเล็กตรอน และโฮล ดังนั้นการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงใช้วิธีเทคนิคของ van der pauw

### 2.3 เทคนิคการวัดของ van der pauw

ในการคำนวณหาค่าทั้งสภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) และความหนาแน่นของพาหะ จะต้องทำการวัดสภาพต้านทานและการวัดฮอลล์ด้วย โดยการใช้เทคนิค van der pauw

$$\text{จากสมการที่ (9)} \quad p = p_0 = \frac{I}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{qdV_H}$$

$$p = \frac{IB}{qdV_H} \quad (14)$$

ดังนั้นขนาดแรงดันฮอลล์ เท่ากับ

$$|V_H| = \frac{IB}{qpd} \quad (15)$$

โดย  $I$  คือ กระแส

$B$  คือ สนามแม่เหล็ก

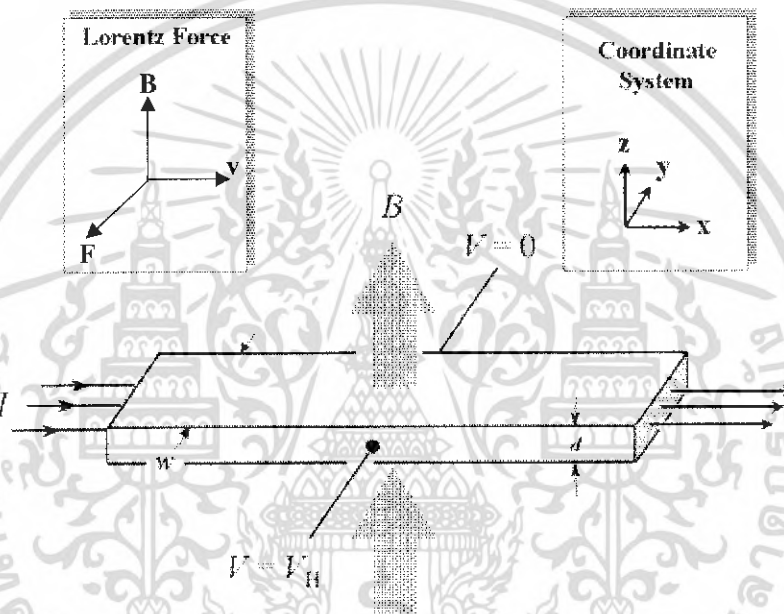
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$d$  คือ ความหนาของแท่งสารกึ่งตัวนำ

$q$  คือ  $1.602 \times 10^{-19}$  C

เพื่อให้สะดวกจะใช้เป็นความหนาแน่นแผ่น (sheet density) ;  $p_s = pd$  แทนที่ bulk density  
จะได้สมการ

$$p_s = \frac{IB}{q|V_H|} \quad (16)$$



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ของฮอลล์

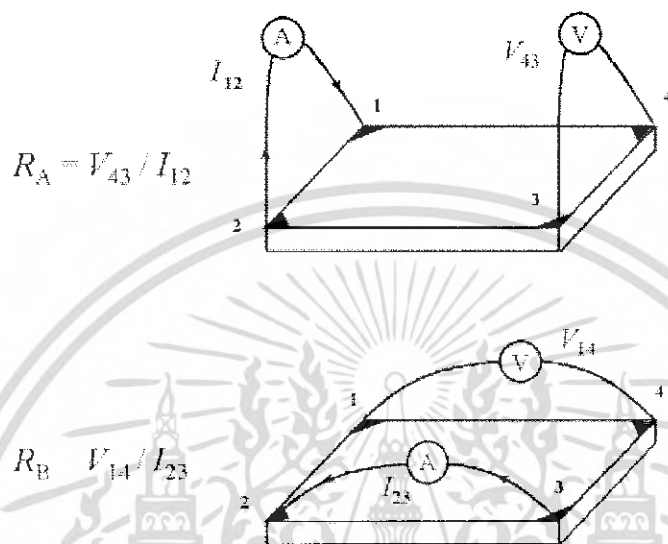
ดังนั้นค่าที่ได้จากการวัดแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) และค่าของ  $I$ ,  $B$  และ  $q$  ที่เรารู้ค่าแล้ว ทำให้สามารถคำนวณหาค่า sheet density ( $p_s$ ) ของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำได้ ถ้าแรงดันฮอลล์เป็นลบจะเป็นชนิดเอ็น แต่ถ้าเป็นบวกจะเป็นชนิดพี ส่วนความต้านทานแผ่น (sheet resistance,  $R_s$ ) คำนวณได้จากเทคนิคการวัด van der pauw ดังนั้นสภาพคล่องตัวฮอลล์ (Hall mobility) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu = \frac{|V_H|}{R_s IB} = \frac{1}{q p_s R_s} \quad (17)$$

และถ้าทราบความหนา ( $d$ ) สามารถคำนวณหา bulk resistivity ( $\rho = R_s d$ ) และ bulk density ( $p = \frac{p_s}{d}$ ) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดความต้านทาน โดยแทงสารกึ่งตัวนำนี้เป็นแผ่นบาง ขั้วสัมผัสของแต่ละมุมต้องเป็น ขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การวัดความต้านทาน โดยเทคนิค van der pauw

จุดประสงค์ในการวัดความต้านทาน เพื่อจะได้คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance,  $R_s$ ) โดยเทคนิคของ van der pauw นี้จะหาค่าความต้านทานใน 2 ลักษณะ คือ  $R_A$  และ  $R_B$  ดังในรูปที่ 2.3 ซึ่ง  $R_A$  และ  $R_B$  นี้มีความสัมพันธ์กับ sheet resistance ( $R_s$ ) ที่อยู่ในสมการ van der pauw ซึ่งสามารถคำนวณหา  $R_s$  ได้

$$\exp\left(\frac{-\pi R_A}{R_s}\right) + \exp\left(\frac{\pi R_B}{R_s}\right) = 1 \quad (18)$$

ดังนั้นสภาพต้านทานคำนวณได้จาก

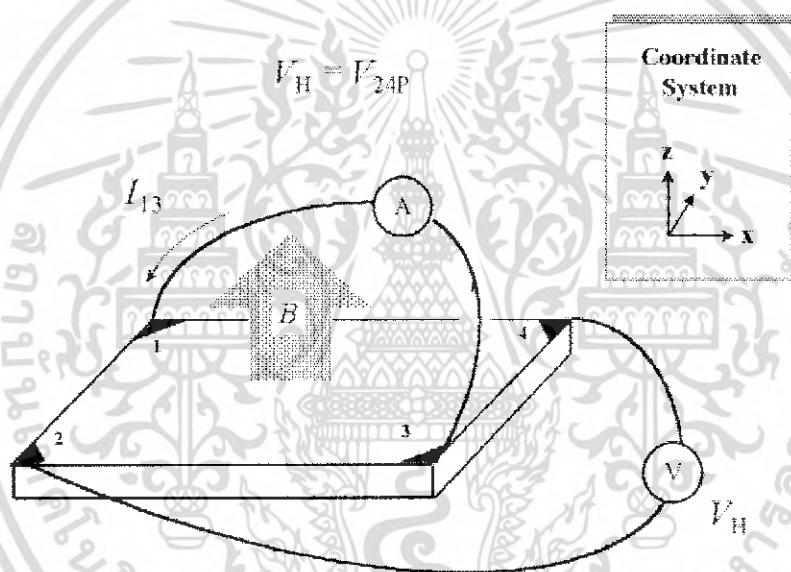
$$\rho = R_s d \quad (19)$$

ความต้านทาน 2 ลักษณะนี้ได้มาจาก การให้กระแสไฟตรงที่ขั้วสัมผัส 1 ออกจากขั้วสัมผัส 2 แล้ววัดแรงดัน  $V_{43}$  จากขั้วสัมผัส 4 กับ 3 ส่วนลักษณะที่สองให้กระแสไฟตรงที่ขั้วสัมผัส 2 ออกจากขั้วสัมผัส 3 แล้ววัดแรงดัน  $V_{14}$  จากขั้วสัมผัส 1 ถึงขั้วสัมผัส 4  $R_A$  และ  $R_B$  คำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{21}} \quad \text{และ} \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (20)$$

การวัดฮอลล์โดยใช้เทคนิค van der pauw คือหาค่า ความหนาแน่นของพาหะแผ่น (sheet carrier density ,  $p_s$ ) โดยใช้การวัดแรงดันฮอลล์ซึ่งประกอบด้วยการวัดแรงดัน การให้กระแส (I) คงที่ และการให้สนามแม่เหล็กคงที่ โดยให้กระแสตั้งฉากกับระนาบของแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.4 ในการวัดฮอลล์นั้นจะต้องให้กระแส (I) เข้าไปยังขั้วสัมผัส 1 กับ 3 และวัดแรงดันฮอลล์  $V_H (= V_{24})$  คือวัดคร่อมขั้วสัมผัส 2 กับ 4 เมื่อทราบค่าแรงดันฮอลล์แล้วสามารถนำไปคำนวณหาค่า sheet carrier density ( $p_s$ ) คือ  $p_s = \frac{IB}{q|V_H|}$  จากที่ทราบได้ค่าของ I , B และ q อยู่ก่อนแล้ว



รูปที่ 2.4 การวัดแรงดันฮอลล์โดยใช้เทคนิค van der pauw

ในทางปฏิบัติต้องพิจารณาการวัดฮอลล์และการวัดสภาพต้านทาน ดังนี้

- (1) ขั้วสัมผัสทั้ง 4 มุม ต้องเป็นขั้วสัมผัสแบบ โอห์มมิก
- (2) แท่งสารกึ่งตัวนำต้องสม่ำเสมอ (uniform) และมีความหนาแน่นที่แน่นอน
- (3) อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) จะทำให้เกิดผลต่อ Thermomagnetic effect
- (4) ทำการวัดในที่มืดเพื่อลดผลกระทบจาก photoconductive และ photovoltaic

ทางด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำต้องกว้างกว่าขนาดของขั้วสัมผัสและความหนาของแท่งสารกึ่งตัวนำนั้น ทั้งนี้ต้องวัดอุณหภูมิของแผ่นกึ่งตัวนำ , ความเข้มสนามแม่เหล็ก , กระแสไฟฟ้า

และแรงดันไฟฟ้าให้ถูกต้องแม่นยำด้วย

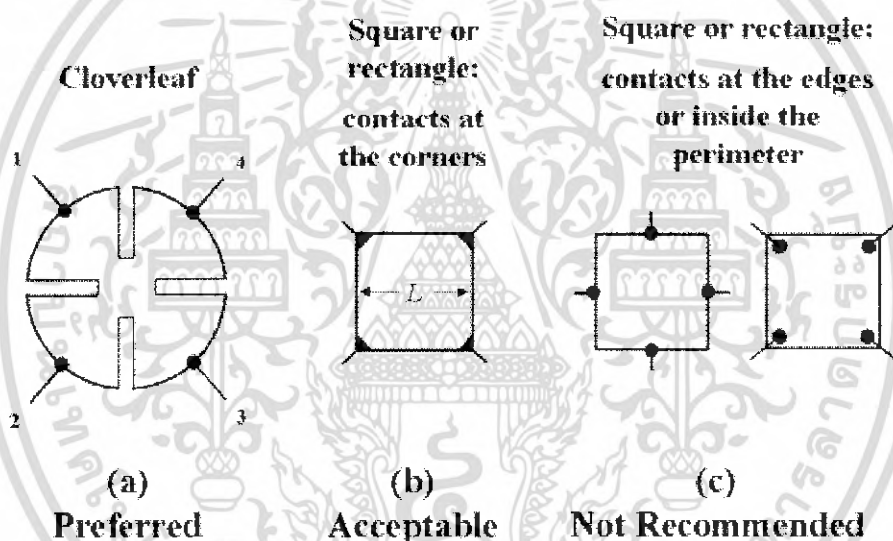
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 การวัดสภาพต้านทานและการวัดฮอลล์

รูปทรงของแท่งสารกึ่งตัวนำในรูปที่ 5 เป็นรูปทรงเรขาคณิตที่สร้างขึ้นมา โดยเป็นแท่งสารกึ่งตัวนำที่เป็นแท่งบาง ซึ่ง  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วสัมผัส และ  $d$  คือความหนาของแท่งสารกึ่งตัวนำ ที่ต้องมีขนาดน้อยกว่าระยะทางระหว่างขั้วสัมผัส ( $L$ )

อุปกรณ์สำหรับการวัด ได้แก่

- แม่เหล็กถาวรหรือเครื่องกำเนิดแม่เหล็ก(Electromagnet) ขนาด 500 - 5,000 gauss
- แหล่งจ่ายกระแส 10  $\mu$ A - 100 mA
- โวลต์มิเตอร์ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง 1  $\mu$ V - 1V



รูปที่ 2.5 รูปทรงแบบต่างๆ ของเทคนิค van der pauw

### 2.3.2 คำนิยามสำหรับการวัดสภาพต้านทาน

ขั้วสัมผัสทั้ง 4 มุมจะเป็นขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก และเป็น 1, 2, 3 และ 4 (ทวนเข็มนาฬิกา) ดังแสดงในรูป 2.5a ซึ่งจะช่วยให้ผลกระทบบของความร้อนทางไฟฟ้า (thermoelectric) น้อยลง และขั้วสัมผัสทั้ง 4 จุดนี้ควรเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

คำนิยามของตัวแปรต่างๆ

$\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นกึ่งตัวนำ ( $\Omega$ .cm)

$d$  = ความหนาของแท่งสารกึ่งตัวนำ (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$I_{12}$  = กระแสไฟตรงบวก ที่จ่ายเข้าไปในขั้วสัมผัส 1 และออกจากขั้วสัมผัส 2 สำหรับ  $I_{31}$ ,  $I_{34}$ ,  $I_{41}$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{14}$ ,  $I_{43}$ ,  $I_{32}$  ทำนองเดียวกัน (amperes,A)  
 $V_{12}$  = วัดแรงดันระหว่างขั้วสัมผัส 1 และ 2 ( $V_1 - V_2$ ) โดยปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) สำหรับ  $V_{23}$ ,  $V_{34}$ ,  $V_{41}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{14}$ ,  $V_{43}$ ,  $V_{32}$  ทำนองเดียวกัน (volt,V)

### 2.3.3 การวัดสภาพต้านทาน

ก่อนที่จะทำการวัดควรตรวจสอบขั้วสัมผัสว่าต้องเป็นแบบ โอห์มมิก และแห้งสารกึ่งตัวนำ ต้องมีลักษณะที่สม่ำเสมอ (uniform)

- ติดตั้งแหล่งจ่ายกระแสไฟ ซึ่งสามารถกำหนดกระแสได้ โดยวัดความต้านทาน ( $R$ ) ระหว่างขั้วสัมผัสที่ตรงข้ามกัน (1, 3 หรือ 2, 4) แล้วคำนวณตามสมการ

$$I < (200 R)^{-0.5} \quad (21)$$

- จ่ายกระแส  $I_{21}$  แล้ววัดแรงดัน  $V_{34}$
- กลับขั้วเป็น  $I_{12}$  แล้ววัด  $V_{43}$
- ทำซ้ำที่เหลืออีก 6 ค่า ( $V_{41}$ ,  $V_{14}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{21}$ ,  $V_{23}$ ,  $V_{32}$ )

ผลของการวัดแรงดันทั้ง 8 ค่านั้น จะได้ค่าความต้านทานมา 8 ค่า โดยค่าความต้านทานทั้งหมดต้องเป็นบวก

$$\begin{aligned} R_{21,34} &= \frac{V_{34}}{I_{21}}, & R_{12,43} &= \frac{V_{43}}{I_{12}} \\ R_{32,41} &= \frac{V_{41}}{I_{32}}, & R_{23,14} &= \frac{V_{14}}{I_{23}} \\ R_{43,12} &= \frac{V_{12}}{I_{43}}, & R_{34,21} &= \frac{V_{21}}{I_{34}} \\ R_{14,23} &= \frac{V_{23}}{I_{14}}, & R_{41,32} &= \frac{V_{32}}{I_{41}} \end{aligned} \quad (22)$$

- ความสอดคล้องของการวัดกระแสที่ตรงข้ามกัน

$$\begin{aligned} R_{21,34} &= R_{12,43}, & R_{43,12} &= R_{34,21} \\ R_{32,41} &= R_{23,14}, & R_{14,23} &= R_{41,32} \end{aligned} \quad (23)$$

- ทฤษฎีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

$$\begin{aligned} R_{21,34} - R_{12,43} &= R_{43,12} + R_{34,21} \\ R_{32,41} - R_{23,14} &= R_{14,23} + R_{41,32} \end{aligned} \quad (24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การคำนวณสภาพต้านทาน

- ความต้านทานแผ่น (sheet resistance,  $R_s$ ) สามารถคำนวณได้จากความต้านทาน 2 ลักษณะนี้

$$R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}) / 4$$

$$R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32}) / 4 \quad (25)$$

แล้วใช้สมการ van der pauw (สมการที่ 18) คำนวณหาค่า  $R_s$  และถ้าทราบค่าความหนา (d) ก็สามารถหาค่า bulk resistivity,  $\rho = R_s d$

### 2.3.5 คำนิยามสำหรับการวัดฮอลล์

การวัดฮอลล์นี้ทำให้ได้ทราบค่าของความหนาแน่นพาหะแผ่น (sheet carrier density,  $p_s$ ) และ bulk carrier density p หรือ n (ชนิดพี หรือชนิดเอ็น) การวัดแรงดันฮอลล์เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องควรใช้โวลต์มิเตอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลเนื่องจากแรงดันฮอลล์มีค่าน้อยมาก (เป็นไมโครโวลต์)

$I_{13}$  = กระแสไฟตรงที่จ่ายเข้าไปในขั้วสัมผัส 1 แล้วออกจากขั้วสัมผัส 3 และทำนองเดียวกันของ  $I_{31}$ ,  $I_{42}$ ,  $I_{24}$

B = ความเข้มสนามแม่เหล็กถาวร โดยมีทิศทางขนานกับแกน z ดังในรูปที่ 4 เมื่อ B เป็นบวกเมื่ออยู่ในทิศแกน +z และ B เป็นลบเมื่ออยู่ในทิศแกน -z

$V_{24P}$  = วัดแรงดันฮอลล์ระหว่างขั้วสัมผัส 2 และ 4 โดยมีสนามแม่เหล็กเป็นบวก (สำหรับ  $I_{13}$ ) และทำนองเดียวกันของ  $V_{24P}$ ,  $V_{24N}$  และ  $V_{42P}$  ส่วนการวัดแรงดันฮอลล์  $V_{24N}$ ,  $V_{42N}$ ,  $V_{13N}$ ,  $V_{31N}$  ทำในลักษณะเดียวกัน โดยมีสนามแม่เหล็กเป็นลบ

### 2.3.6 ขั้นตอนพื้นฐานของการวัดฮอลล์

ขั้นตอนการวัดฮอลล์ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก
- จ่ายกระแส  $I_{13}$  ที่ขั้ว 1 และ 3 แล้ววัด  $V_{24P}$   
จ่ายกระแส  $I_{31}$  ที่ขั้ว 3 และ 1 แล้ววัด  $V_{42P}$   
ในทำนองเดียวกัน ให้กระแส  $I_{42}$  และ  $I_{24}$  แล้ววัด  $V_{13P}$  และ  $V_{31P}$  ตามลำดับ
- กลับสนามแม่เหล็ก (-B)
- ในทำนองเดียวกัน จ่ายกระแส  $I_{13}$ ,  $I_{31}$ ,  $I_{42}$  และ  $I_{24}$  แล้ววัด  $V_{24N}$ ,  $V_{42N}$ ,  $V_{13N}$  และ  $V_{31N}$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดแรงดันฮอลล์  $V_{24P}$ ,  $V_{42P}$ ,  $V_{13P}$ ,  $V_{31P}$ ,  $V_{24N}$ ,  $V_{42N}$ ,  $V_{13N}$  และ  $V_{31N}$  สามารถหาชนิดของแท่งสารกึ่งตัวนำ (เอ็นหรือพี) และ sheet carrier density ( $p_s$ ) ได้ ส่วนสภาพคล่องของพาหะ (Hall mobility) สามารถหาได้จาก sheet density ( $p_s$ ) และ sheet resistance ( $R_s$ ) ที่ได้มาจากการวัดสภาพต้านทาน

### 2.3.7 การคำนวณฮอลล์

ขั้นตอนการคำนวณ carrier density และ Hall mobility มีดังนี้

- คำนวณตามสมการข้างล่างนี้ (เครื่องหมายที่ได้จากการวัดแรงดันให้คงไว้)

$$\begin{aligned} V_C &= V_{24P} - V_{24N}, & V_D &= V_{42P} - V_{42N}, \\ V_E &= V_{13P} - V_{13N} & \text{and } V_F &= V_{31P} - V_{31N} \end{aligned} \quad (26)$$

- ชนิดของแท่งสารกึ่งตัวนำหาได้จากผลรวมของแรงดัน  $V_C + V_D + V_E - V_F$  ถ้าผลรวมเป็นบวกแสดงว่าแท่งสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ถ้าเป็นลบแสดงว่าแท่งสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น
- sheet carrier density (มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-2}$ ) คำนวณได้จาก

$$p_s = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)}$$

ถ้าผลรวมของแรงดันเป็นลบ ได้

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{q(V_C + V_D + V_E + V_F)} \right| \quad (27)$$

โดย B คือสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น gauss (G) และ I คือกระแสไฟตรงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

- bulk carrier density (มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$ ) สามารถหาค่าได้ถ้าทราบความหนา (d) ของแผ่นกึ่งตัวนำ

$$\begin{aligned} p &= \frac{p_s}{d} \\ n &= \frac{n_s}{d} \end{aligned} \quad (28)$$

- Hall mobility ( $\mu$ ) =  $\frac{1}{q p_s R_s}$  (มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) หาค่าได้จาก sheet carrier

density  $p_s$  (หรือ  $n_s$ ) และ sheet resistance ( $R_s$ ) คูณในสมการที่ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.8 การแก้สมการของ van der Pauw

การแก้สมการของ van der Pauw (สมการที่ 18) เพื่อหาค่า sheet resistance ( $R_s$ ) ที่ได้จากการวัดความต้านทานในสองลักษณะ  $R_A$  และ  $R_B$

$$\exp\left(\frac{\pi R_A}{R_s}\right) + \exp\left(\frac{\pi R_B}{R_s}\right) = 1$$

ค่า error จะต้องไม่เกิน  $\delta = 0.0005$  หรือ  $0.05\%$

$$\text{คำนวณค่าเริ่มต้นของ } Z_i \text{ คือ } Z_0 = \frac{2 \ln(2)}{\pi(R_A + R_B)}$$

$$\text{คำนวณค่าที่ } th \text{ ของ } Y_i = \frac{1}{\exp(\pi Z_i - iR_A)} + \frac{1}{\exp(\pi Z_i - iR_B)}$$

คำนวณค่าที่ th ของ  $Z_i$  โดย

$$Z_i = Z_{i-1} - \frac{[(1 - Y_i) / \pi]}{[R_A / \exp(\pi Z_{i-1} - iR_A)] + [R_B / \exp(\pi Z_{i-1} - iR_B)]}$$

เมื่อ  $\frac{(Z_i - Z_{i-1})}{Z_i}$  น้อยกว่า  $\delta$  ให้หยุดแล้วคำนวณ sheet resistance,  $R_s = \frac{1}{Z_i}$  แล้วคำนวณหาค่า

สภาพต้านทาน  $\rho = R_s d$

### 2.5 ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )

ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางแสง(optical devices)ต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์แสดงผล(Flat-Panel Displays)อย่าง จอ LCD (liquid crystal display) หรือ โซลาร์เซลล์ (solar cell) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ มีลักษณะบางอย่างที่ต้องการเหมือนกันคือ ความต้องการของวัสดุตัวกลางที่มีลักษณะโปร่งแสง เพื่อให้แสงที่ต้องการส่งออกหรือรับเข้านั้น ส่งผ่านไปยังตำแหน่งที่เราต้องการ และความต้องการสื่อที่มีลักษณะนำไฟฟ้าในตัวด้วยเช่นเดียวกัน เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นแสดงพฤติกรรมต่างๆทางไฟฟ้าและแสงที่ส่งออกหรือรับเข้ามานั้นเอง

ในการใช้งานรูปแบบอื่นที่มีความสำคัญไม่แพ้กันกับอุปกรณ์ทางแสงก็คือ กระจกที่ใช้งานตามโครงสร้างอาคาร ที่มีวัสดุโปร่งแสงและนำไฟฟ้าเคลือบอยู่ เพื่อช่วยในการลดความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ตัวอาคาร (low emissivity window) หรือการใช้งานคู่กันของกระจกสองแผ่นและมีสารอีกชนิดที่ควบคุมการส่องผ่านของแสงโดยการเรียงตัวของโมเลกุลสาร โดยใช้ไฟฟ้าควบคุมผ่านกระจกทั้งสองแผ่น(smart window) และอีกรูปแบบหนึ่งที่กำลังพัฒนากันในตอนนี้ก็คือ การนำวัสดุโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ มาทำการเจือสารให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type และ n-type แล้วนำมาสร้างเป็นรอยต่อ p-n Heterojunction เพื่อนำไปใช้งานในอุปกรณ์ทางแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น วัสดุที่ได้กล่าวถึงก็คือ Transparent Conducting Oxides (TCOs) ซึ่งก็คือวัสดุที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและโปร่งแสงในเวลาเดียวกัน นับว่าเป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากต่อการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ทางแสงต่างๆตามที่กล่าวมาตั้งแต่ตอนต้น รายงานเรื่องวัสดุ TCOs มีขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1907 เมื่อ Badeker รายงานว่า ฟิล์มบางโลหะแคดเมียม (Cd) ที่ปลูกในห้องทดลองมีการออกซิไดซ์เกิดขึ้น โดยส่งผลให้ฟิล์มบางแคดเมียมมีลักษณะโปร่งแสง ซึ่งในขณะเดียวกัน ก็มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่ด้วย จากรายงานดังกล่าว วัสดุ TCOs ก็เริ่มถูกผลิตออกมาในรูปแบบทางการค้ามากขึ้น และวัสดุต่างๆที่มีลักษณะเป็น TCOs ก็มีรายงานเพิ่มมากขึ้น อย่างเช่น Al-doped ZnO, GdInO<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub>, F-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และอื่นๆอีกมากมาย แต่ที่เป็นที่นิยมในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง(opto-electronic device) ส่วนใหญ่จะเป็น Tin-doped Indium Oxide (ITO) เนื่องจาก ITO นี้เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในด้านการนำไฟฟ้าและการส่องผ่านของแสง รวมถึงการคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาผลิตใหม่ได้ และยังมีโครงสร้างพื้นผิวที่ดีอีกด้วย

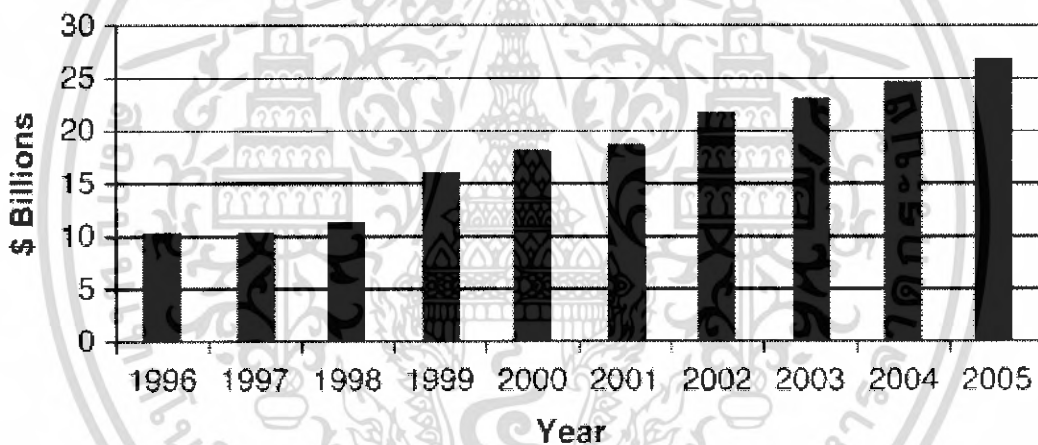


Figure 1. Market forecast for flat-panel display sales (data from DisplaySearch).

รูปที่ 2.6 แนวโน้มการใช้งาน TCOs

ในปัจจุบัน การใช้งาน TCOs มีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นทุกปี จากกราฟตัวอย่างเป็นกราฟมูลค่าของอุปกรณ์ FPDs ที่ผลิตขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณ TCOs ที่ถูกผลิตขึ้นเช่นกัน กราฟมีลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคตต่อไป สิ่งนี้เองเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้วัสดุ TCOs นั้น เป็นวัสดุที่มีบุคลากรส่วนใหญ่สนใจที่จะศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้วัสดุเหล่านี้มีราคาถูกลงและประสิทธิภาพดีขึ้น นำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ใหม่ๆที่สามารถนำ TCOs ไปใช้งานได้เหมาะสมต่อไป

### 2.5.1 ชนิดของ Transparent Conducting Oxides (TCOs)

รายงานส่วนใหญ่จะเป็นการพัฒนาฟิล์ม TCOs ที่เน้นไปทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด n-type เพราะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย โดยในฟิล์ม TCOs นั้นมีหลายรูปแบบ อย่างในรูปแบบของสารประกอบสองชนิด(Binary Compound) เช่น  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , สารประกอบสองชนิดที่เจือสารอื่น (Impurity-doped) เช่น F-doped  $\text{SnO}_2$ , tin-doped  $\text{In}_2\text{O}_3$ , สารประกอบสามชนิด(Ternary Compound) เช่น  $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgIn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CdSb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{ZnSnO}_3$ ,  $\text{GaInO}_3$  และสารประกอบแบบสองชนิดมาสองสารรวมกัน(Binary-Binary Compound Systems)หรือสารประกอบแบบสามชนิดสองสารรวมกัน(Ternary-Ternary Compound Systems) เช่น  $\text{ZnO-SnO}_2$  และ  $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5-\text{MgIn}_2\text{O}_4$  ตามลำดับ โดยสองอย่างหลังนี้จะรวมเรียกว่าสารผสมหลายอย่าง(multicomponent oxides) ซึ่งการที่มีการพัฒนาสารผสมหลายอย่างขึ้นมา นั้น จะช่วยให้สามารถออกแบบฟิล์ม TCOs ที่เหมาะกับอุปกรณ์เฉพาะแต่ละอย่างได้อย่างเหมาะสม เพราะทั้งเรื่องคุณสมบัติทางแสง ทางไฟฟ้า ทางเคมี และทางโครงสร้างนั้น สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมส่วนผสมของสารเคมีตั้งต้นแต่ต้นนั่นเอง

ใน TCOs แบบ binary compound นั้น ประโยชน์อย่างหนึ่งของแบบนี้คือส่วนประกอบของ TCOs นั้นควบคุมได้ง่ายกว่า ternary compound และแบบ multicomponent oxides ใน TCOs แบบ binary compound ที่มีนั้นได้แก่  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$  และ  $\text{CdO}$  โดยสารที่กล่าวมา ก็มีการทั้งแบบเจือสารและไม่เจือสารชนิดอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ TCOs ในด้านที่ต้องการ และแต่ละสารนั้นก็ให้คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆแตกต่างกันไป โดยเลือกการใช้งานให้เหมาะสมกับประเภทการใช้งาน ตัวอย่างเช่น  $\text{SnO}_2$  มีความทนต่อต่อสารเคมีอื่นๆและอุณหภูมิสูงได้ดีแต่นำไฟฟ้าไม่ดีเท่า ITO ส่วน  $\text{In}_2\text{O}_3$  นั้นนำไฟฟ้าดีกับส่องผ่านแสงดีแต่มีราคาแพง  $\text{CdO}$  นั้นนำไฟฟ้าได้ดีแต่เป็นสารที่มีอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม  $\text{ZnO}$  นั้นก็มีการเจือสารหลายชนิดด้วยกัน ผลของการเจือสารนั้นทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ  $\text{ZnO}$  เปลี่ยนไปตามชนิดสารที่เจือดังตารางที่แสดงต่อไปนี้

Table i: Resistivities, Carrier Concentrations, and Dopant Content for ZnO Films Doped with Various Impurities.

Dopant	Doping Content (at.%)	Resistivity ( $10^{-4} \Omega \text{ cm}$ )	Carrier Concentration ( $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )
Al	1.6–3.2	1.3	15.0
Ga	1.7–6.1	1.2	14.5
B	4.5	2.0	5.4
Y	2.2	7.9	5.8
In	1.2	8.1	3.9
Sc	2.5	3.1	6.7
Si	8.0	4.8	8.8
Ge	1.6	7.4	9.8
Ti	2.0	5.6	6.2
Zr	5.4	5.2	5.5
Hf	4.1	5.5	3.5
F	0.5	4.0	5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO เปลี่ยนไปตามชนิดสารที่เจือ

ใน TCOs แบบ ternary compound เป็น TCOs ที่เกิดจากสารสามชนิดมารวมกันอย่างเช่น  $Zn_2In_2O_5$  แต่ในความจริงแล้ว สารประกอบสามชนิดที่มารวมกันนั้น ความจริงเป็นการเกิดขึ้นของสารแบบ binary-binary compound system นั้นเอง ตัวอย่างเช่น การเตรียม binary-binary compound system ของ  $ZnO-In_2O_3$  นั้นจะทำการใช้ magnetron sputtering deposition (MSD) สารที่ต้องการสร้าง ( $In_2O_3$ ) ลงผงของสารที่สร้างไว้แล้วอีกชนิดหนึ่ง ( $ZnO$ ) โดยเมื่อทำการสร้างที่อุณหภูมิสูงถึง 350 องศาเซลเซียส สารทั้งสองชนิดจะเกิดเปลี่ยนแปลงทางผลึกกลายเป็นวัสดุ TCOs ชนิดใหม่ซึ่งก็คือ  $Zn_2In_2O_5$  นั้นเอง โดยโครงสร้างใหม่นี้ ก็จะมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างจากวัสดุเดิมทั้งสองชนิดที่มารวมกัน ส่วนผสมของสารสองชนิดที่ปริมาณต่างๆกัน ก็จะส่งผลให้คุณสมบัติภายในต่างๆ เปลี่ยนไปคล้ายเช่นกันดังกราฟข้างล่าง และตารางที่แสดงต่อไปนี้แสดงตัวอย่างของสารประกอบแบบ ternary compound ของ TCOs

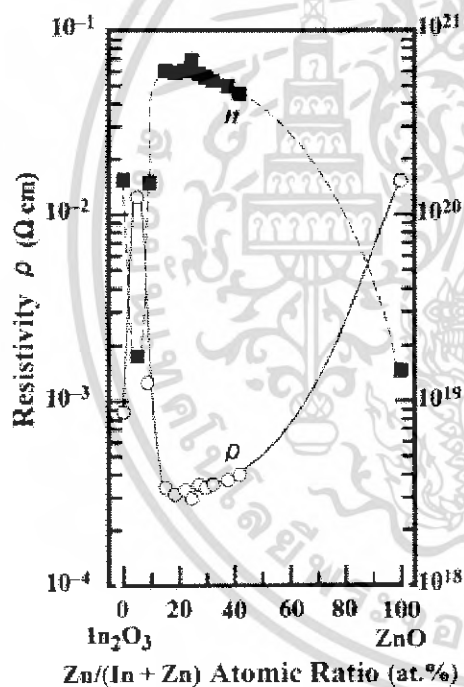


Figure 3. Resistivity (○) and carrier concentration (■) as functions of Zn content for  $ZnO-In_2O_3$  films prepared at room temperature by dc magnetron sputtering deposition (MSD).

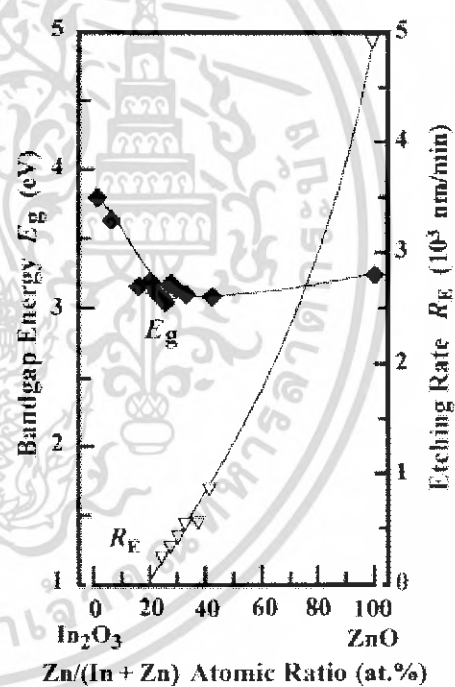


Figure 4. Etching rate (▽) and bandgap energy (◆) as functions of Zn content for  $ZnO-In_2O_3$  films prepared at room temperature by dc MSD

### รูปที่ 2.7 คุณสมบัติของสารประกอบแบบ ternary compound ของ TCOs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table II: Resistivity and Deposition Method of Reported Transparent Conducting Thin Films Composed of Ternary Compound TCO Materials.**

Material	Resistivity $\rho$ ( $\Omega$ cm)	Deposition Method (Substrate Temperature)	Reference
Zn <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>	$1.7 \times 10^{-2}$	rf MSD*	4
ZnSnO <sub>3</sub>	$4 \times 10^{-3}$	rf MSD (RT)	7
MgIn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$4.3 \times 10^{-3}$	rf sputtering*	5
	$7.9 \times 10^{-4}$	rf MSD (RT)	11
GaInO <sub>3</sub>	$2.7 \times 10^{-3}$	rf MSD*	8
(Ga,In) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$5.8 \times 10^{-4}$	dc MSD (RT)	39
Zn <sub>2</sub> In <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$3.9 \times 10^{-4}$	rf MSD (RT)	9
	$2.9 \times 10^{-4}$	dc MSD (RT)	38
In <sub>4</sub> Sn <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	$2.0 \times 10^{-4}$	dc MSD (350°C)	10

Note: TCO is transparent conducting oxide; MSD is magnetron sputtering deposition; RT is room temperature.

\* Postannealed

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารประกอบแบบ ternary compound ของ TCOs

ในทำนองเดียวกัน สารประกอบแบบ ternary-ternary compound system นั้นก็จะทำการสร้างสารหนึ่งบนสารอีกชนิดหนึ่ง ในการรวมแต่ละสาร ก็จะทำให้คุณสมบัติต่างของ TCOs เปลี่ยนไป ตามแต่ละคุณสมบัติที่เราต้องการเช่นกัน

### 2.5.2 การสร้าง Transparent Conducting Oxides (TCOs)

ในขั้นตอนของการสร้างฟิล์ม TCOs นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารเคมีที่นำมาใช้แล้ว ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้ในการสร้างด้วยเช่นกัน กระบวนการในการสร้าง TCOs นั้นก็มีหลายวิธี เช่น sputtering, evaporation, pulsed laser deposition, sol-gel, chemical bath deposition, electroplating ซึ่งแต่ละวิธีก็จะใช้สารได้แตกต่างกันและก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ไม่ว่าจะทางด้านโครงสร้างของฟิล์มเมื่อสร้างออกมา(ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม) อุณหภูมิขณะทำการสร้าง(ทำให้เลือกฐานรองได้หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความต้องการของอุปกรณ์) ความต้องการเครื่องมือทันสมัยเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อม(อุปกรณ์สำหรับสุญญากาศหรืออุปกรณ์สำหรับควบคุมตรวจจับพิษของสารอย่างCd) ระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มต่อความสูงของฟิล์มที่ต้องการ (บางวิธีใช้เวลามาก กว่าจะได้ความสูงของฟิล์มในระดับหนึ่ง) ราคาต้นทุนของอุปกรณ์ที่ใช้กันต่างๆ (ระบบสุญญากาศจะมีต้นทุนเครื่องมือที่สูงกว่าระบบไม่สุญญากาศ) ทุกอย่างที่กล่าวมา ล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญในการที่เลือกสร้างฟิล์ม TCOs เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพการเงินและเหมาะสมกับโครงสร้างฟิล์มสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ จากตาราง เป็นตัวอย่างของวิธีการสร้างที่ใช้กับสารชนิดต่างๆ ของผู้ทดลองที่ได้เคยทำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table I: History of Processes for Making Transparent Conductors.

Materials and Process	Reference
Ag by chemical-bath deposition	Unknown Venetian
SnO <sub>2</sub> :Sb by spray pyrolysis	J.M. Mochel (Corning), 1947 <sup>1</sup>
SnO <sub>2</sub> :Cl by spray pyrolysis	H.A. McMaster (Libbey-Owens-Ford), 1947 <sup>2</sup>
SnO <sub>2</sub> :F by spray pyrolysis	W.O. Lytle and A.E. Junge (PPG), 1951 <sup>3</sup>
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn by spray pyrolysis	J.M. Mochel (Corning), 1951 <sup>4</sup>
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn by sputtering	L. Holland and G. Siddall, 1955 <sup>5</sup>
SnO <sub>2</sub> :Sb by CVD	H.F. Dates and J.K. Davis (Corning), 1957 <sup>6</sup>
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> by sputtering	A.J. Nozik (American Cyanamid), 1974 <sup>7</sup>
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> by spray pyrolysis	A.J. Nozik and G. Haacke (American Cyanamid), 1976 <sup>8</sup>
SnO <sub>2</sub> :F by CVD	R.G. Gordon (Harvard), 1979 <sup>9</sup>
TiN by CVD	S.R. Kurtz and R.G. Gordon (Harvard), 1986 <sup>10</sup>
ZnO:In by spray pyrolysis	S. Major et al. (Ind. Inst. Tech.), 1984 <sup>11</sup>
ZnO:Al by sputtering	T. Minami et al. (Kanazawa), 1984 <sup>12</sup>
ZnO:In by sputtering	S.N. Gju et al. (McGill), 1987 <sup>13</sup>
ZnO:B by CVD	P.S. Vijayakumar et al. (Arco Solar), 1988 <sup>14</sup>
ZnO:Ga by sputtering	B.H. Choi et al. (KAIST), 1990 <sup>15</sup>
ZnO:F by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1991 <sup>16</sup>
ZnO:Al by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1992 <sup>17</sup>
ZnO:Ga by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1992 <sup>18</sup>
ZnO:In by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1993 <sup>19</sup>
Zn <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> by sputtering	H. Enoki et al. (Tohoku), 1992 <sup>20</sup>
ZnSnO <sub>3</sub> by sputtering	T. Minami et al. (Kanazawa), 1994 <sup>21</sup>
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> by pulsed laser deposition	J.M. McGraw et al. (Colorado School of Mines and NREL), 1995 <sup>22</sup>

### ตารางที่ 2.3 วิธีการสร้างที่ใช้กับสารชนิดต่างๆ

#### 2.5.3 คุณสมบัติของฟิล์ม TCOs ที่พิจารณา

##### ประสิทธิภาพทางแสงและทางไฟฟ้าของ TCOs (Figure of merit)

ใน TCOs ที่เราต้องการใช้งานนั้น ควรจะมีค่าความนำไฟฟ้าที่สูงและการดูดกลืนแสงที่ต่ำ การที่เราจะบ่งบอกประสิทธิภาพของ TCOs แต่ละอย่างที่เราต้องการนั้น บ่งบอกได้จากอัตราส่วนของ สภาพนำไฟฟ้า (conductivity:  $\sigma$ ) กับ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (visible absorption coefficient:  $\alpha$ ) เราเรียกว่า figure of merit ซึ่งหาได้จากสูตร

$$\frac{\sigma}{\alpha} = -\{R_s \ln(T + R)\}^{-1}$$

โดยที่  $R_s$  คือความต้านทานแผ่น ( $\Omega/sq$ ),  $T$  คือ แสงทั้งหมดที่ส่องผ่าน,  $R$  คือแสงทั้งหมดที่สะท้อนกลับ ค่าที่คำนวณได้ ถ้ามีค่า figure of merit มากเท่าไร ยิ่งบ่งบอกว่ามีประสิทธิภาพดีมากขึ้น จากตารางดังต่อไปนี้ แสดงตัวอย่าง figure of merit ของ TCOs บางชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table II: Figures of Merit  $\alpha/\rho$  for Some Transparent Conductors.

Material	Sheet Resistance ( $\Omega/\square$ )	Visible Absorption Coefficient $\alpha$	Figure of Merit ( $\Omega^{-1}$ )
ZnO:F	5	0.03	7
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>	7.2	0.02	7
ZnO:Al	3.8	0.05	5
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn	6	0.04	4
SnO <sub>2</sub> :F	8	0.04	3
ZnO:Ga	3	0.12	3
ZnO:B	8	0.05	2
SnO <sub>2</sub> :Sb	20	0.12	0.4
ZnO:In	20	0.20	0.2

ตารางที่ 2.4 figure of merit ของ TCOs บางชนิด

#### สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

ในอุปกรณ์บางอย่าง เช่น FPDs นั้นมีความต้องการสภาพการนำไฟฟ้าที่มาก เพื่อให้ FPDs นั้นตอบสนองการทำงานที่ความถี่สูงๆ ได้ทัน สภาพการนำไฟฟ้านั้นจึงเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่จำเป็นอย่างหนึ่งในการพิจารณาฟิล์ม TCOs

ในโลหะอย่างเช่น เงิน(silver) และ ไททาเนียมไนไตรด์ (titanium nitride) ปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระนั้นจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางไฟฟ้าของสารชนิดนั้นๆ แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้น ปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระพิจารณาว่าได้จากอะตอมสารเจือที่ได้ผสมลงไปเพื่อแทนที่อะตอมในผลึก แต่ถึงอย่างไร การแทนที่อะตอมก็ไม่สามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจุดที่เกิดการบกพร่อง (defect) ก็จะทำให้ความคล่องตัว(mobility)ของอิเล็กตรอนลดลง จากตารางข้างล่าง เป็นการเรียงลำดับสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ TCOs บางชนิด

Table III: Approximate Minimum Resistivities and Plasma Wavelengths for Some Transparent Conductors.

Material	Resistivity ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )	Plasma Wavelength ( $\mu\text{m}$ )
Ag	1.6	0.4
TiN	20	0.7
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn	100	>1.0
Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>	130	>1.3
ZnO:Al	150	>1.3
SnO <sub>2</sub> :F	200	>1.6
ZnO:F	400	>2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงประชุมเท่านั้น ไม่ควรออกตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตารางที่ 2.5 สภาพต้านทานไฟฟ้าของ TCOs บางชนิด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Plasma Frequency

Plasma frequency คือความถี่ที่แบ่งการทำงานของ TCOs ออกเป็นสองช่วง โดยช่วงที่ความถี่มีค่าเหนือ Plasma frequency อิเล็กตรอนใน TCOs จะไม่ตอบสนองการทำงาน ดังนั้น TCOs จึงทำหน้าที่คล้ายกับฉนวนโปร่งแสงเท่านั้น ในทางกลับกัน ถ้าเป็นช่วงที่ต่ำกว่า Plasma frequency อิเล็กตรอนก็จะตอบสนองต่อการทำงาน ดังนั้น TCOs ก็จะสะท้อนและดูดกลืนแสงที่ผ่านมา

สำหรับ TCOs ส่วนใหญ่จะมีค่า Plasma frequency อยู่ในย่าน near-infrared หรือในย่านแสงที่มีความถี่สูง โดยที่ความถี่ Plasma frequency นั้นจะมีลำดับเรียงตัวกันตามความสภาพความต้านทานไฟฟ้าดังตารางที่แสดงด้านล่าง

### Work Function

สำหรับ Work Function นั้นก็เป็นพลังงานน้อยสุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการนำไฟฟ้าได้ ค่าที่แตกต่างกันนั้น ก็มีผลต่อการนำไปใช้งานด้วยเช่นกัน ซึ่ง Work Function บางตัวก็แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

Table IV: Work Functions of Some Transparent Conductors.

Material	Work Function (eV)	Electron Concentration (cm <sup>-3</sup> )
ZnO:F	4.2	$2 \times 10^{20}$
ZnO	4.5	$7 \times 10^{18}$
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn	4.8	$> 10^{20}$
SnO <sub>2</sub> :F	4.9	$4 \times 10^{20}$
ZnSnO <sub>3</sub>	5.3	$5 \times 10^{19}$

ตารางที่ 2.6 ค่า work function

### เสถียรภาพทางความร้อนของ TCOs (Thermal Stability)

ใน TCOs นั้น ค่าความต้านทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างถาวร ถ้ามีการให้ความร้อนที่เหมาะสม ในเวลาที่เพียงพอ ในแต่ละสาร TCOs จะมีอุณหภูมิที่สามารถทนได้เหนือกว่าอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการสร้าง อย่างใน tin oxide ที่สร้างบนกระจกนั้นปลูกในอุณหภูมิที่สูงอยู่แล้ว เมื่อทำการให้ความร้อนซ้ำที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น (reheat) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของฟิล์ม ฟิล์ม TCOs ก็จะสามารถที่จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่าตอนก่อนทำ reheat ผลที่ได้ก็คือสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นนั่นเอง ในอีกกรณีก็คือ Cadmium stannate ถึงแม้ปลูกที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อทำการแอนนิล (anneal) ที่อุณหภูมิสูง ผลก็คือสามารถทนอุณหภูมิได้สูงขึ้นถึง 1100 องศาเซลเซียส

จากตารางเป็นการแสดงทดลองของสารที่ปลูกอุณหภูมิหนึ่งและอุณหภูมิที่ทนได้ก่อนความต้านทานเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table V: Thermal Stability of Some Transparent Conductors.**

Material	Deposition Temperature (°C)	Stability Temperature (°C)
LPCVD ZnO:B	200	<250
APCVD ZnO:F	450	<500
APCVD SnO <sub>2</sub> :F	650	<700

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิที่ทนได้ก่อนความต้านทานเปลี่ยน

### อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำการสร้างฟิล์ม TCOs ได้

เมื่อทำการสร้างฟิล์ม TCOs ลงบนฐานรอง อุณหภูมิของฐานรองก็ควรจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงเพื่อที่จะให้ได้คุณสมบัติของ TCOs ที่ต้องการ อย่างการเรียงตัวต่อไปนี้ Ag, ITO < ZnO < SnO<sub>2</sub> < Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> ซึ่งอย่าง Ag และ ITO สามารถสร้างขึ้นบนฐานรองที่อุณหภูมิต่ำอย่างพลาสติกก็ได้ แต่ ในขณะที่ cadmium stannate (Cd<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub>) นั้นฐานรองที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงมากเพื่อที่จะสามารถสร้างฟิล์มให้คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้ออกมาดี

### Diffusion Barriers between Transparent Conductors and Sodium-Containing Glass Substrates

เมื่อทำการสร้างฟิล์ม TCOs ลงบนกระจกที่มีส่วนผสมของโซเดียม เช่น Soda-lime glass ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปลูกคือ โซเดียมจะแพร่ผ่านไปยังชั้นฟิล์ม TCOs ซึ่งผลของการแพร่นั้นก่อให้เกิดความต้านทานที่ชั้นฟิล์มมากขึ้นซึ่งเกิดขึ้นในฟิล์ม tin oxide เพราะโซเดียมนั้นจะแพร่ได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิฐานรอง >550 องศาเซลเซียส จึงได้มีการแก้ปัญหาโดยมีชั้นป้องกันการแพร่ของโซเดียมชั้น โดยมีสารที่ใช้อยู่ 2 ชนิดคือ ซิลิกา (Silica) และ อลูมินา (Alumina) โดยสารทั้งสองชนิดจะถูกสร้างขึ้นบนกระจก ก่อนที่ทำการสร้างชั้น TCOs นั้นเอง

### Etching Patterns in TCOs

สำหรับการใช้งาน TCOs ในรูปแบบต่างๆเช่น เป็น display, heater, antenna นั้นจะต้องมีการเอา TCOs บางส่วนออกเพื่อขึ้นลายที่เราต้องการ TCOs แต่ละชนิดก็ใช้สารในการกัดลายแตกต่างกัน อย่าง tin oxide กับ ITO ค่อนข้างมีความยุ่งยากในการกัดลาย ซึ่งสารอื่นๆก็แสดงตัวอย่างได้ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table VI: Etchants for Transparent Conductors.**

Material	Etchant
ZnO	Dilute acids
ZnO	Ammonium chloride
TiN	$H_2O_2 + NH_3$
$In_2O_3$	$HCl + HNO_3$ or $FeCl_3$
$SnO_2$	$Zn + HCl$
$SnO_2$	$CrCl_2$

ตารางที่ 2.8 สารเคมีในการกัดลาย

### Chemical Durability

ความคงทนต่อสภาวะทางเคมี ซึ่งมีผลต่อการใช้งานอยู่มาก มีทิศทางในทางตรงกันข้ามกับการกัดลาย อย่างเช่น tin oxide ที่มีความยุ่งยากในการกัดลาย แต่ในทางตรงข้าม ก็มีความทนต่อสภาวะทางเคมีสูงกว่าสารชนิดอื่นๆด้วยเช่นกัน ส่วน ZnO นั้นแม้โดนกรดหรือเบส ก็ก่อให้เกิดความเสียหายได้ หรืออย่างในโลหะเงิน เพียงแค่สภาพอากาศก็สามารถที่จะก่อให้เกิดผลเสียต่อฟิล์ม TCOs ได้ด้วยเช่นกัน

### Stability in Hydrogen Plasmas

ในการสร้างโซลาร์เซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนที่ปลูกลงบนกระจกที่เคลือบ TCOs นั้น จะต้องผ่านกระบวนการ plasma ด้วย โดยวิธีการนี้จะมีอะตอมของไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบด้วย ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะไปทำให้ TCOs มีการดูดกลืนแสงมากขึ้น ซึ่งเราไม่ต้องการให้เกิน เช่นนั้น ดังนั้น TCOs ที่เหมาะสมในการสร้างโซลาร์เซลล์ก็อาจต้องเลือกเงื่อนไขนี้เข้าไปด้วย อย่างเช่น tin oxide นั้นตอบสนองกับอะตอมไฮโดรเจน แต่ในขณะที่ ZnO นั้นมีผลกับไฮโดรเจน น้อยมาก

### Mechanical Hardness of TCOs

ความแข็งแรงคงทนต่อสภาพทางกลต่างๆของฟิล์ม TCOs นั้นขึ้นอยู่กับความเร็วตัวของฟิล์มที่สร้างขึ้น โดยค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุนั้นบอกได้จาก Mohs scale ซึ่งค่าที่มากหมายถึงมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย แสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table VII: Hardness of Some Transparent Conductors.**

Material	Mohs Hardness
TiN	9
SnO <sub>2</sub>	6.5
Soda-lime glass	6
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~5
ZnO	4
Ag	low

ตารางที่ 2.9 ความคงทนต่อสภาพทางกลต่างๆของฟิล์ม TCOs

### Production Costs

ต้นทุนการผลิตฟิล์ม TCOs นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่างคือ วัสดุที่ใช้สร้างฟิล์ม กับกระบวนการที่ใช้สร้างฟิล์ม ในวัสดุบางอย่างเช่น Indium นั้น มีราคาแพงมาก เพราะเป็นการสกัดมาจากส่วนประกอบในธาตุชนิดอื่นอีกที ซึ่งอินเดียจะปะปนอยู่น้อยมากในธาตุอื่น ไม่มีแหล่งอินเดียโดยเฉพาะ เป็นเหตุให้มีราคาสูง ส่วนวัสดุอื่นๆ ราคาก็เรียงลำดับดังต่อไปนี้ Cd < Zn < Ti < Sn < Ag < In

ในกระบวนการสร้างฟิล์มนั้น วิธีที่ใช้ในการสร้างต่างๆจะมีต้นทุนแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเครื่องมือในกระบวนการนั้นๆ ซึ่งมีตัวอย่างเรียงลำดับดังนี้ atmospheric-pressure CVD < Vacuum evaporation < magnetron sputtering < low-pressure CVD < sol-gel < pulsed laser deposition

นอกเหนือจากต้นทุนอุปกรณ์แล้ว ความเร็วในการสร้างฟิล์มให้ถึงความหนาที่ต้องการนั้น ก็มีส่งผลผลิตออกมาด้วย ดังนั้นความเร็วในการสร้างฟิล์มก็ถือเป็นต้นทุนอย่างหนึ่ง อย่างใน atmospheric-pressure CVD, Vacuum evaporation, magnetron sputtering จะมีอัตราการสร้างฟิล์มที่เร็ว และสามารถได้ในพื้นที่ฐานรองขนาดใหญ่ด้วย ใน low-pressure CVD จะมีราคาต้นทุนอุปกรณ์ที่สูงมาก วิธี sol-gel นั้นสร้างได้ช้า เนื่องจากการเคลือบและการให้ความร้อนช้าๆ และใน pulsed laser deposition สามารถทำได้แค่เฉพาะกรณีพื้นที่ฐานรองขนาดเล็กๆเท่านั้น ปัจจัยการสร้างชั้นฟิล์มมีมากมายหลายอย่างที่ส่งผลต่อต้นทุน ดังนั้นเราควรคำนึงถึงกระบวนการที่ใช้ในการสร้างฟิล์ม TCOs ให้เหมาะสมกับปริมาณการผลิตและความยืดหยุ่นในการใช้งานที่หลากหลายประเภทด้วย

### Toxicity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสารบางอย่างที่ใช้ในการสร้าง TCOs นั้นมีความเป็นพิษอยู่ สาเหตุนี้เองก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วย เนื่องจากจะต้องการป้องกันคนงานและป้องกันการรั่วไหลของสารออกมายังสภาพแวดล้อมด้วย อีกทั้งการจัดหาวิธีการที่จะนำสารเป็นพิษเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่เมื่ออุปกรณ์เหล่านั้นหมดอายุการใช้งานด้วย ความเป็นพิษของสารเรียงลำดับดังต่อไปนี้  $Zn < Sn < In < Ag < Cd$  ซึ่งแคดเมียมนั้น เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งและเป็นสารควบคุมและยังกำหนดให้ใช้ได้เฉพาะอุปกรณ์บางประเภทเท่านั้น

ในการสร้างฟิล์มบางนั้น มีหลายปัจจัยที่เราควรคำนึงถึงในการสร้าง ความเหมาะสมต่างๆ ในด้านการผลิต การเงิน การใช้งาน การป้องกัน ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงเป็นอันดับต้นๆว่าจะผลิต TCOs ชนิดแบบไหนเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการ จะผลิต TCOs ด้วยวิธีอะไรเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดสาร TCOs ที่เราได้เลือกผลิต สิ่งที่ต้องคำนึงถึงต่างๆก็ได้กล่าวมาแล้ว แล้ว ดังนั้นปัจจัยต่างๆในการสร้างก็เป็นขั้นตอนที่ไม่ควรจะละเลยในการพิจารณาด้วย

ในการพิจารณาเลือก TCOs เพื่อการใช้งานในอย่างใดอย่างหนึ่งนั้น ไม่มี TCOs ชนิดไหนที่มีความสมบูรณ์พร้อมในทุกอย่างที่ต้องการ แต่ก็จะมี TCOs บางชนิดที่เหมาะสมที่สุดกับอุปกรณ์หรือการใช้งานแต่ละประเภท ซึ่งตารางต่อไปนี้ ได้สรุปคุณสมบัติต่างๆไว้

Table VIII: Choice of Transparent Conductors.

Property	Material
Highest transparency	ZnO:F, Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>
Highest conductivity	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn
Lowest plasma frequency	SnO <sub>2</sub> :F, ZnO:F
Highest plasma frequency	Ag, TiN, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn
Highest work function, best contact to p-Si	SnO <sub>2</sub> :F, ZnSnO <sub>3</sub>
Lowest work function, best contact to n-Si	ZnO:F
Best thermal stability	SnO <sub>2</sub> :F, TiN, Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub>
Best mechanical durability	TiN, SnO <sub>2</sub> :F
Best chemical durability	SnO <sub>2</sub> :F
Easiest to etch	ZnO:F, TiN
Best resistance to H plasmas	ZnO:F
Lowest deposition temperature	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn, ZnO:B, Ag
Least toxic	ZnO:F, SnO <sub>2</sub> :F
Lowest cost	SnO <sub>2</sub> :F

ตารางที่ 2.10 TCOs ที่เหมาะสมกับอุปกรณ์หรือการใช้งานแต่ละประเภท

#### 2.5.4 ตัวอย่างการใช้งานกับการเลือกใช้ชนิด TCOs

##### Low-Emissivity Windows in Buildings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขของความถี่ plasma frequency ที่จะอยู่ในช่วงอินฟราเรด ดังนั้นแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด ซึ่งจะมีคลื่นความร้อน จะถูกสะท้อนกลับออกไป ส่วนที่จะผ่านไปก็จะมีแต่แสงที่ต้องการเท่านั้น จากประโยชน์ตรงนี้เอง ที่นำ TCOs มาสร้างบนกระจกแล้วนำกระจกไปใช้ตามอาคารต่างๆ อีกทั้งกระจกรถยนต์ กระจกเครื่องบิน เป็นต้น

สิ่งที่ทำให้แตกต่างกับฟิล์มกรองแสงความร้อนทั่วไปคือ TCOs นั้นจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสะท้อนหรือกรองแสงตามสภาพอากาศ เพราะ plasma wavelength จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิสภาพอากาศรอบๆตัว ในสภาพอากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มมากขึ้นทำให้สภาพต้านทานลดลง plasma wavelength จะมีค่าลดลงด้วย ในสภาพอากาศที่อุณหภูมิลดลง อิเล็กตรอนอิสระจะน้อยลงส่งผลให้สภาพต้านทานสูงขึ้น plasma wavelength จะมีค่าสูงขึ้นด้วย จากพฤติกรรมดังกล่าวเมื่อทำการออกแบบ plasma wavelength ที่ใช้ตามอาคารให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ต้องการ ก็จะสามารถควบคุมได้ในหน้าหนาวความร้อนจากภายนอกเนื่องจากอินฟราเรดก็เข้ามาข้างในได้ ในหน้าร้อนความร้อนจากภายนอกก็ถูกสะท้อนกลับออกไป ซึ่งเป็นข้อดีที่แตกต่างจากฟิล์มกรองแสงความร้อนทั่วไปนั่นเอง

จากที่กล่าวมาวัสดุ TCOs ที่เหมาะกับการนำมาใช้งานมากที่สุดก็คือ F-doped tin oxide เพราะเนื่องจากมีความเหมาะสมของ plasma wavelength และความคงทนต่างๆ อีกทั้งยังมีราคาถูกด้วย กระจกที่ฉาบด้วย TCOs นั้นมีปริมาณมากมายที่ถูกนำไปใช้งานแล้วทั่วโลก

### Solar Cells

ในโซลาร์เซลล์แบบอะมอร์ฟิซิลิกอนนั้น เราต้องใช้ TCOs เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อให้เกิดการทำงานได้ และในการสร้างโซลาร์เซลล์แบบอะมอร์ฟิซิลิกอนนั้นจะทำการปลูกชั้นอะมอร์ฟิซิลิกอนบนกระจกที่ผ่านการสร้าง TCOs มาแล้ว ดังนั้น TCOs ที่เหมาะสมกับการสร้างก็คือ F-doped tin oxide เนื่องจากมีความคงทนทางเคมีและราคาประหยัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้งาน และ work function ของ F-doped tin oxide นั้นก็ยังมีค่าที่เหมาะสมกับชั้น p-type อะมอร์ฟิซิลิกอนด้วย

ในอะมอร์ฟิซิลิกอนโซลาร์เซลล์ที่สร้างลงบนฐานรองที่ยึดหยุ่นพับงอได้อย่างเหลือเฟือหรือพลาสติกนั้น การเลือกใช้งาน TCOs ก็จะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากพลาสติกทนอุณหภูมิได้ต่ำ วัสดุที่เลือกใช้ในการสร้างก็จะเปลี่ยนเป็น ITO หรือ ZnO แทนเพราะสามารถสร้างชั้นฟิล์มได้ที่อุณหภูมิต่ำนั่นเอง

### Flat-Panel Displays

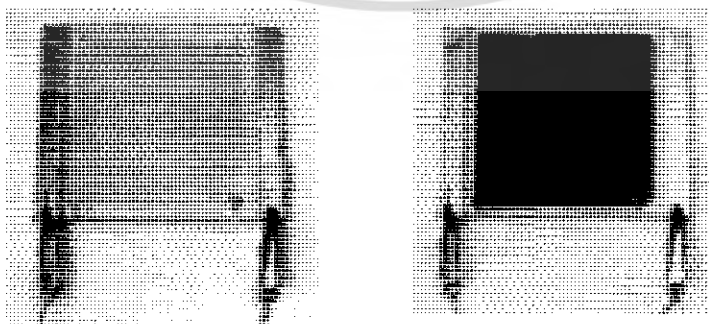
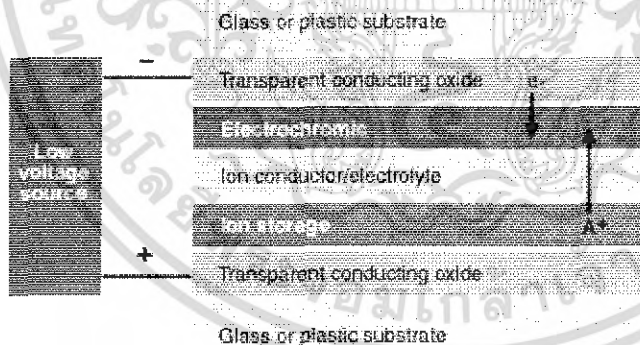
ในอุปกรณ์แสดงผลอย่าง FPDs นั้นก็มีการใช้ TCOs เป็นขั้วตัวนำโปร่งแสงด้วยเช่นเดียวกัน เงื่อนไขในการเลือกใช้งานที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์ FPDs ก็คือความสามารถในการกัดลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ TCOs ด้วยเหตุผลของความง่ายในการกัดลาย tin oxide จึงไม่ใช่วัสดุหลักที่เราใช้ เนื่องจากมีความยากในการกัดลาย

ใน ITO นั้นก็มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการส่งผ่านของแสงที่เหมาะสมด้วยอยู่แล้ว ปัจจัยในการกัดลายนั้นก็ยังเหมาะสมในการนำมาใช้งานด้วย ทั้งหมดนี้เองจึงทำให้ ITO เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้งานทางด้านจอแสดงผล ในขณะที่เดียวกัน ZnO ก็มีการพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการส่งผ่านมาพอสมควร อีกทั้งความสามารถในการกัดลายยังสามารถทำได้ดีกว่า ITO เสียอีก และยังมีราคาที่ถูกมากด้วย ดังนั้นในอนาคต ZnO ก็อาจจะสามารถนำมาแทน ITO ได้อย่างสมบูรณ์

### Electrochromic Mirrors and Windows

ในงานกระจกอีกประเภทที่ใช้งานก็คือ กระจกปรับการส่งผ่านของแสงแบบอโต้โมติ ซึ่งนำไปใช้กับกระจกหลังของรถยนต์เป็นจำนวนมาก อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบด้วยกระจกที่เคลือบด้วย F-doped tin oxide (เหตุผลคือทนต่อสารเคมีต่างๆ) สองแผ่นประกบกันและมีสารเคมีอีกชนิดที่ทำหน้าควบคุมการส่งผ่านของแสงโดยใช้ไฟฟ้าควบคุม กระจกชนิดนี้เรียกว่า สมาร์ทวินโดว์ (Smart window) จากรูปภาพเป็นตัวอย่างแสดงภาพตัดขวางของอุปกรณ์ชนิดนี้ และภาพขนาดแสงผ่านได้ และแสงผ่านไม่ได้



รูปที่ 2.8 Electrochromic Mirrors and Windows

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Defrosting Windows

ตู้แช่แข็งตามซูเปอร์มาเก็ตนั้น จะมีการใช้ TCOs ด้วยเช่นกัน โดยการนำกระจกที่เคลือบ TCOs มาใช้เป็นกระจกตู้แช่ แล้วใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เพื่อให้เกิดความร้อน ไม่ให้เกิดไอน้ำเกาะที่กระจก ดังนั้นวัสดุที่ถูกต้องและทนต่อการสภาพทางเคมีและทางกลที่เหมาะสมก็คือ tin oxide นั่นเอง

### Oven Windows

กระจกเตาอบนั้นมีการเคลือบด้วย TCOs ชนิด tin oxide เป็นการป้องกันความร้อนที่จะแผ่ออกมานอกเตาด้วย และยังเป็นยังสามารถที่จะทำความสะอาดตัวเองได้เมื่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นในการที่เลือก tin oxide มาเป็นวัสดุที่ใช้เหตุผลในการเลือกก็คือสามารถทนอุณหภูมิสูง ทนต่อเคมี และแรงทางกลต่างๆ ได้ดี และมีราคาถูกด้วย

### Static Dissipation

TCOs ยังคงนำไปเคลือบกระจกเพื่อใช้ในการป้องกันไฟฟ้าสถิตด้วย อย่างเช่น กระจกในเครื่องถ่ายเอกสาร หลอดฉายภาพในโทรทัศน์ หรือจอ CRT ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งควรจะมี ความต้านมากกว่า 1 kohm/sq ดังนั้นวัสดุที่เลือกใช้จึงต้องทนต่อสภาพทางเคมีและแรงทางกลต่างๆ ด้วย ดังนั้น tin oxide จึงเป็นวัสดุที่ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้งานในงานนี้

### Touch-Panel Controls

ในจอแสดงผลแบบสัมผัสได้อย่างเช่น จอแสดงผลบน ATM จะต้องมีการสัมผัสหน้าจอ ในขณะที่ใช้งานโดยตลอด ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุ TCOs จึงเลือกที่มีความถูกและทนต่อแรงทางกล ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกใช้ก็เป็น tin oxide นั่นเอง

### Electromagnetic Shielding

ในการใช้งานอีกรูปแบบหนึ่งในการป้องกันการรั่วไหลข้อมูลโดยการดักจับทางคอมพิวเตอร์ หรือการสื่อสารต่างๆผ่านทางสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางหน้าต่าง โดยการทำป้องกันสัญญาณที่ผ่านหน้าต่างด้วยกระจกที่เคลือบด้วย TCOs ที่มีความต้านทานน้อยๆ อย่างเช่น silver และ ITO ก็เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน

### Invisible Security Circuits

กระจกที่เคลือบ TCOs ยังนำไปใช้ได้กับการซ่อนวงจรไฟฟ้าด้วย อย่างเช่นกระจกนิรภัยที่ป้องกันวัตถุหรือสิ่งของที่มีค่า มีลายวงจรไฟฟ้าซ่อนอยู่ เมื่อมีการสัมผัสถูกหรือเกิดการลัดวงจร หรือเปิดวงจรเกิดขึ้น สัญญาณนิรภัยที่ระบบได้ออกแบบไว้ก็จะทำการเตือนขึ้นนั่นเอง ซึ่งวัสดุ TCOs สำหรับการใช้งานประเภทนี้ ก็จะใช้วัสดุได้หลายชนิด (ยกเว้น TiN เนื่องจากมีสีชัดเจน) ที่สามารถทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลตได้

### Improving the Durability of Glass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานกระจกทั่วไป บางครั้งก็มีการแสดงตัวอักษรข้อความ ภาพ หรือสัญลักษณ์ต่างๆที่ต้องการด้วยการกัดกระจก ซึ่งการกัดกระจกจะใช้กรดไฮโดรฟลูออริกในการกัด แต่กรดนี้ไม่มีผลต่อ tin oxide ดังนั้นในการกัดสัญลักษณ์ ข้อความ ต่างๆนั้น ก็จะใช้ tix oxide เคลือบส่วนที่ไม่ต้องการกัดเอาไว้ หรือในอีกกรณีก็คือในเครื่องอ่านบาร์โค้ดก็มีการใช้ tin oxide เคลือบกระจกส่วนที่เป็นหัวอ่านเอาไว้ เพื่อป้องกันรอยขีดข่วนต่างๆที่จะเกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีการทดลอง

ในโครงงานนี้มีอยู่ 2 ส่วน คือ การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) และการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )

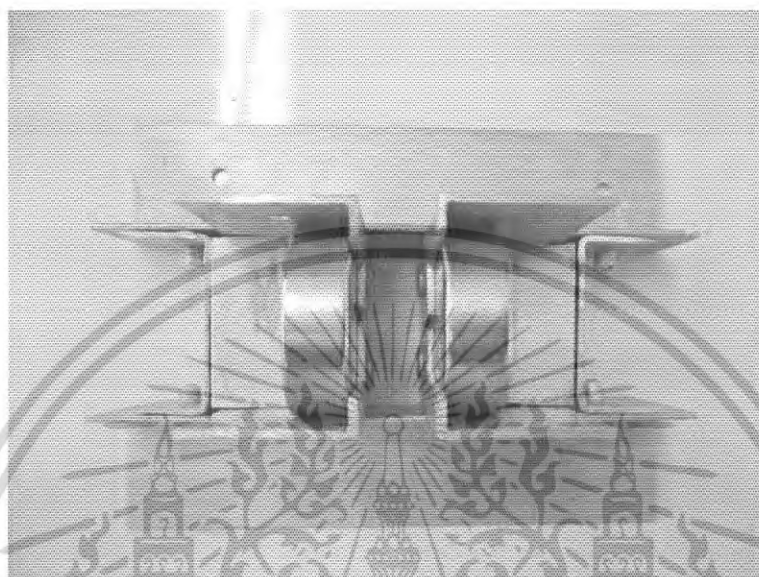
การศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) เป็นการวัดและหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ เช่นสภาพต้านทานไฟฟ้า, ความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ซึ่งในโครงงานนี้จะศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) โดยใช้เทคนิคของ van der pauw

#### 3.1 วิธีการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้เทคนิค van der pauw

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม

- แม่เหล็กถาวร ซึ่งในโครงงานนี้ใช้แม่เหล็กถาวรขนาด 3000 เกาส์ (gauss) ระยะห่าง 1 cm. ดังแสดงในรูปที่ 3.1
- แผ่น sample ITO (Indium Tin Oxide) ขนาด 1.2x1.2 cm.
- ชุดควบคุมและโปรแกรม Labview ในการวัดฮอลล์
- แบบใช้กาวเงินติดที่มุมของแผ่น ITO ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และแบบใช้โฟรมเพื่อไม่ให้แผ่น sample เกิดความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- กาวเงิน (Ag-paste) ใช้ในการเชื่อมระหว่างแผ่น ITO กับเส้นลวดตัวนำให้ติดกัน
- สายโคแอกเซียล เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก
- กล่องใส่แม่เหล็กที่ shield ด้วย Aluminium foil เพื่อวัดความต้านทานของแผ่น ITO และวัดแรงดันฮอลล์ ซึ่งต้องวัดในที่มืดและกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการทดลอง

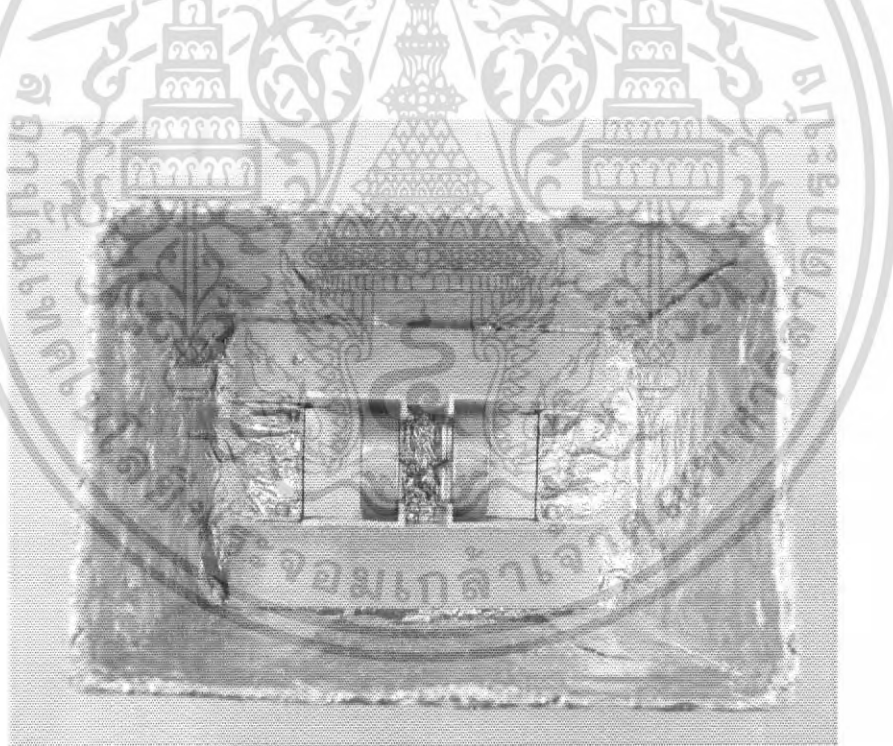


รูปที่ 3.2 แบบใช้กาวเงินติดที่มุมของแผ่น ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

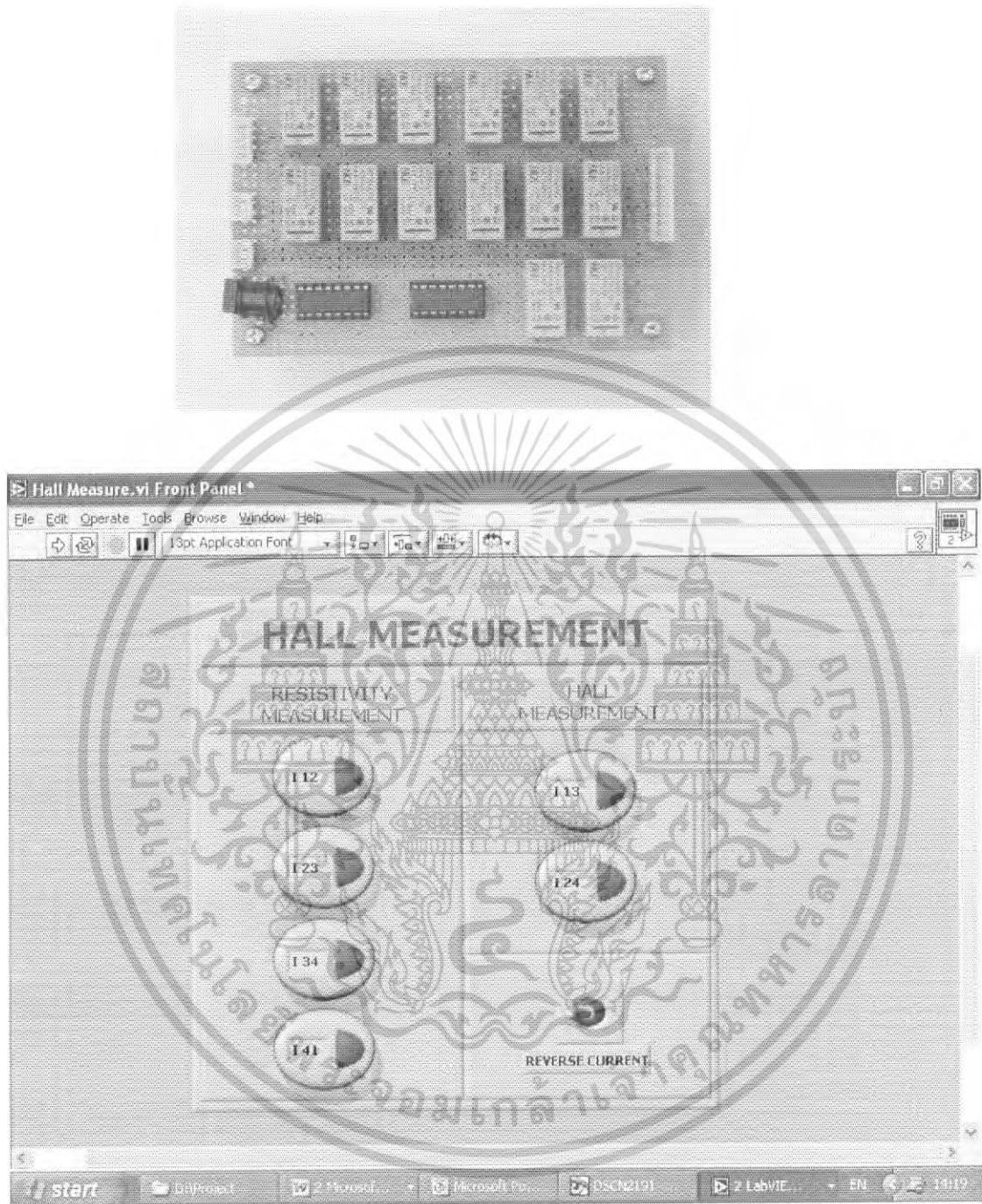


รูปที่ 3.3 แบบใช้โฟรบ



รูปที่ 3.4 กล่องใส่แม่เหล็กที่ shield ด้วย Aluminium foil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมและโปรแกรม Labview ที่สร้างขึ้นมาในการวัดฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วิธีการทดลอง โดยใช้กาวเงินติดขั้วแผ่น ITO

- วัดค่าความต้านทานของแผ่น ITO ที่มุม 1 กับ 3 หรือ 2 กับ 4 เพื่อดำเนินการหาค่ากระแสที่จะใช้ในการจ่ายเข้าไป ตามสมการ

$$I < (200R)^{-0.5}$$

- หาค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance ,  $R_s$ ) เมื่อคำนวณกระแสได้แล้ว ให้จ่ายกระแสและวัดแรงดันตามตารางที่ 3.1 โดยยังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก

กระแส	แรงดัน
$I_{21}$	$V_{34}$
$I_{12}$	$V_{43}$
$I_{32}$	$V_{41}$
$I_{23}$	$V_{14}$
$I_{43}$	$V_{12}$
$I_{34}$	$V_{21}$
$I_{14}$	$V_{23}$
$I_{41}$	$V_{32}$

ตารางที่ 3.1 วัดแรงดันโดยยังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก

- การวัดแรงดันฮอลล์ โดยนำแผ่น ITO ไปใส่ในภายใต้สนามแม่เหล็กโดยสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศ  $-z$  และใช้กระแสเท่าเดิมและวัดแรงดันตามตารางที่ 3.2

กระแส	แรงดันฮอลล์
$I_{13}$	$V_{24P}$
$I_{31}$	$V_{42P}$
$I_{42}$	$V_{13P}$
$I_{24}$	$V_{31P}$

ตารางที่ 3.2 การวัดแรงดันฮอลล์ สนามแม่เหล็กอยู่ในทิศ  $+z$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับสนามแม่เหล็ก (-z) แล้ววัดแรงดันตามตารางที่ 3.3

กระแส	แรงดันฮอลล์
$I_{13}$	$V_{24N}$
$I_{31}$	$V_{42N}$
$I_{42}$	$V_{13N}$
$I_{24}$	$V_{31N}$

ตารางที่ 3.3 การวัดแรงดันฮอลล์ สนามแม่เหล็กอยู่ในทิศ -z

- นำค่าที่ได้จากตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ไปคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น, ความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องตัวของพาหะ โดยใช้เทคนิคของ van der pauw ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

### 3.1.3 ทดลอง โดยใช้โพรบ

ซึ่งจะทำการทดลองและคำนวณเหมือนกับในขั้นตอน 3.1.2

### 3.1.4 วิธีการทดลอง โดยเปลี่ยนตำแหน่งแผ่น ITO

โดยเปลี่ยนตำแหน่งแผ่น ITO ให้ห่างจากแม่เหล็ก 0.2 cm. เพื่อดูว่ามีผลอย่างไรบ้าง ซึ่งจะทำการทดลองและคำนวณเหมือนกับในขั้นตอน 3.1.2

### Resistivity and Hall Measurements

**วัดค่าความต้านทาน**

จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)	จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)	จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)	จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)
I(21) =	A	V(34) =	V	R(21,34) =	$\Omega$		
I(12) =	A	V(43) =	V	R(12,43) =	$\Omega$		
I(32) =	A	V(41) =	V	R(32,41) =	$\Omega$		
I(23) =	A	V(14) =	V	R(23,14) =	$\Omega$		
I(43) =	A	V(12) =	V	R(43,12) =	$\Omega$		
I(34) =	A	V(21) =	V	R(34,21) =	$\Omega$		
I(14) =	A	V(23) =	V	R(14,23) =	$\Omega$		
I(41) =	A	V(32) =	V	R(41,32) =	$\Omega$		

**วัดแรงดันฮอลล์**

สนามแม่เหล็ก (B) =  Gauss

สนามแม่เหล็กเป็นบวก (ทิศทางแกน +Z)

จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)	จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)
I(13) =	A	V(24P) =	V
I(31) =	A	V(42P) =	V
I(42) =	A	V(13P) =	V
I(24) =	A	V(31P) =	V

สนามแม่เหล็กเป็นลบ (ทิศทางแกน -Z)

จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)	จำนวนกระแส (I)	วัดแรงดัน (V)
I(13) =	A	V(24N) =	V
I(31) =	A	V(42N) =	V
I(42) =	A	V(13N) =	V
I(24) =	A	V(31N) =	V

**ผลการวัด**

ค่าความต้านทาน  $R_s =$    $\Omega$

ความหนาแน่นพาหะ  $n(s) =$    $cm^{-3}$

ค่าการกลิ้ง (mobility)  $\mu =$    $cm^2/Vs$

รูปที่ 3.6 การคำนวณ โดยใช้ Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ )

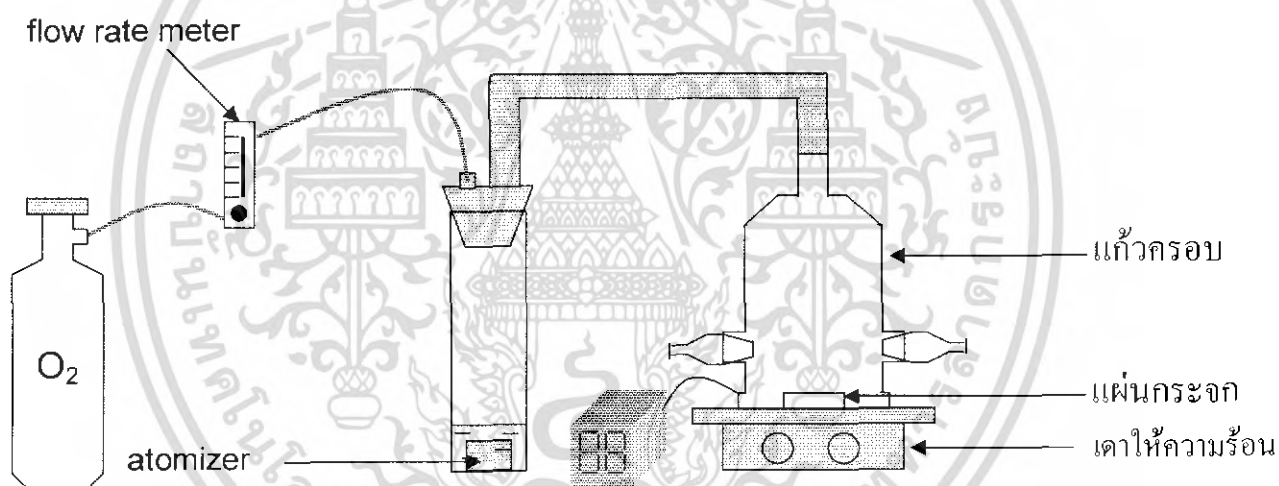
#### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

- แก้วครอบ
- atomicizer
- ที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$
- กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นรองรับฟิล์ม
- เทอร์โมคัปเปิล
- สารตั้งต้นที่ใช้ Stannous chloride ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Ammonium fluoride ( $\text{NH}_4\text{F}$ )

Ethyl Alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )

Hydrochloric ( $\text{HCl}$ )



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$

#### 3.2.2 เงื่อนไขที่ทำการทดลอง

1) การทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่  $300^\circ\text{C}$ ,  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  โดยใช้ความเข้มข้น F 10% โดยใช้สารตั้งต้น

Stannous chloride ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	2.256 g
Ammonium fluoride ( $\text{NH}_4\text{F}$ )	0.185 g
Ethyl Alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	100 ml
Hydrochloric ( $\text{HCl}$ )	0.831 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ F ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็น 0%, 10%, 20%, 30% โดยน้ำหนักของ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

สารตั้งต้น	ปริมาณ (g)
$\text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.256
$\text{NH}_4\text{F}$ (0% wt) หรือ ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0$ )	0.000
$\text{NH}_4\text{F}$ (10% wt) หรือ ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.1$ )	0.226
$\text{NH}_4\text{F}$ (20% wt) หรือ ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.2$ )	0.451
$\text{NH}_4\text{F}$ (30% wt) หรือ ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.3$ )	0.677

ตารางที่ 3.4 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2\text{:F}$

### 3.2.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2\text{:F}$

- 1) ทำความสะอาดกระจกสไลด์ โดย
  - ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน โดยทำการสั่นด้วยอัลตราโซนิก 10 นาที
  - ทำความสะอาดด้วยเอทานอล โดยทำการสั่นด้วยอัลตราโซนิก 10 นาที
  - ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI โดยทำการสั่นด้วยอัลตราโซนิก 10 นาที
- 2) เตรียมสารตั้งต้นที่ประกอบด้วย Stannous chloride ( $\text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), Ammonium fluoride ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), Ethyl Alcohol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), Hydrochloric ( $\text{HCl}$ ) ตามที่กำหนดไว้
- 3) นำสารละลายจากข้อ 2 ใส่ในแก้วภาชนะที่มี atomizer อยู่แล้ว
- 4) นำกระจกสไลด์มาวางบนเตา
- 5) ปรับเตาให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิที่  $300^\circ\text{C}$
- 6) เมื่อ atomizer ทำงานแล้วปล่อยก๊าซออกซิเจนในอัตรา 1 l/min และทำการทดลองเป็นเวลา 15 นาที
- 7) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขอุณหภูมิเป็น  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$  ตามลำดับ
- 8) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-6 โดยใช้อุณหภูมิที่  $400^\circ\text{C}$  และเปลี่ยนปริมาณของ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.4
- 9) นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาศึกษาพื้นผิว
- 10) นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาศึกษาการส่งผ่านแสง
- 11) นำฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมได้ มาทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า จาก

#### ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยใช้เทคนิค van der Pauw

##### 4.1.1 ผลการทดลอง แบบใช้กาวเงิน (Ag-paste)

วัดค่าความต้านทานของแผ่น sample ที่มุม 1 กับ 3 ได้  $20.04 \Omega$

คำนวณหาค่ากระแส  $I < (200R)^{0.5}$  ได้  $15.79 \text{ mA}$  เพราะฉะนั้นกระแสต้องต่ำกว่า  $15.79$

mA

กระแส (I) mA	ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) $\Omega/\square$	ความหนาแน่นของ พาหะ ( $n_s$ ) $\text{cm}^{-2}$	สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
0.1	9.45	$0.882 \times 10^{16}$	75
1	10	$1.47 \times 10^{16}$	42.3
3	10.1	$1.51 \times 10^{16}$	40.5
5	10.1	$1.52 \times 10^{16}$	40.6
7	10.1	$1.53 \times 10^{16}$	40.4
10	10.1	$1.52 \times 10^{16}$	40.8

ตารางที่ 4.1 ค่า ( $R_s$ ,  $n_s$ ,  $\mu$ ) แบบใช้กาวเงิน (Ag-plate)

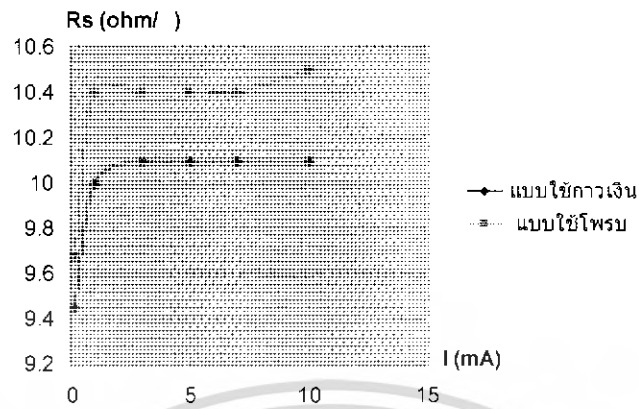
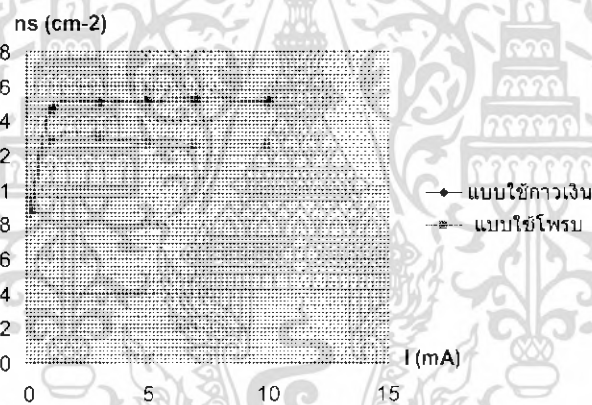
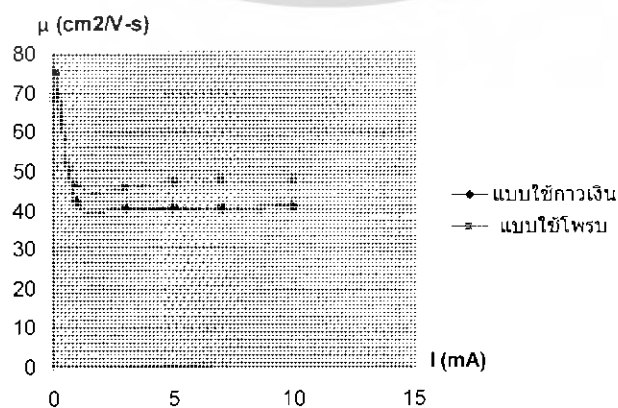
##### 4.1.2 ผลการทดลอง แบบใช้โพรบ (probe)

วัดค่าความต้านทานของแผ่น ITO ที่มุม 1 กับ 3 ได้  $42 \Omega$

คำนวณหาค่ากระแส  $I < (200R)^{0.5}$  ได้  $11.2 \text{ mA}$

กระแส (I) mA	ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) $\Omega/\square$	ความหนาแน่นของ พาหะ ( $n_s$ ) $\text{cm}^{-2}$	สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
0.1	9.67	$0.937 \times 10^{16}$	68.9
1	10.4	$1.29 \times 10^{16}$	46.6
3	10.4	$1.32 \times 10^{16}$	45.5
5	10.4	$1.27 \times 10^{16}$	47.1
7	10.4	$1.26 \times 10^{16}$	47.7
10	10.5	$1.26 \times 10^{16}$	47.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับตารางที่ 4.2 ค่า ( $R_s$ ,  $n_s$ ,  $\mu$ ) แบบใช้โพรบ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบค่า  $R_s$  แบบใช้กาวเงินกับโฟรมรูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $R_s$  แบบใช้กาวเงินกับ โฟรมเปรียบเทียบค่า  $n_s$  แบบใช้กาวเงินกับโฟรมรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $n_s$  แบบใช้กาวเงินกับ โฟรมเปรียบเทียบค่า  $\mu$  แบบใช้กาวเงินกับโฟรมรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\mu$  แบบใช้กาวเงินกับ โฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลการทดลอง แบบใช้กาวเงิน โดยไม่ได้ shield ด้วย Aluminium foil

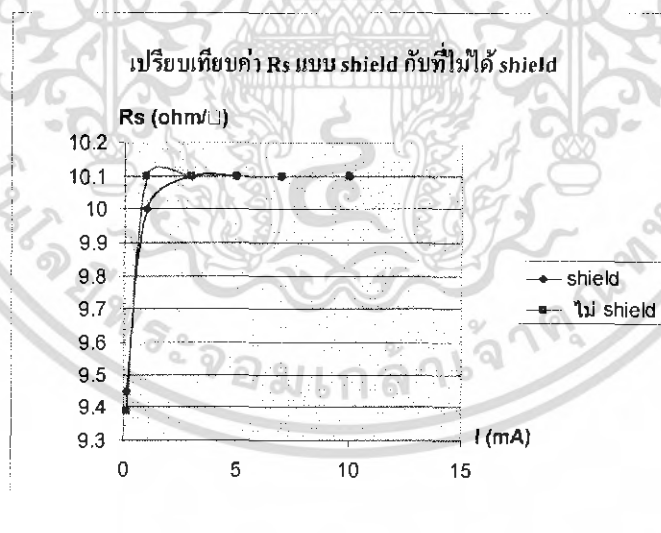
วัดค่าความต้านทานของแผ่น sample ที่มุม 1 กับ 3 ได้  $20.04 \Omega$

คำนวณหาค่ากระแส  $I < (200R)^{0.5}$  ได้  $15.79 \text{ mA}$  เพราะฉะนั้นกระแสต้องต่ำกว่า  $15.79$

mA

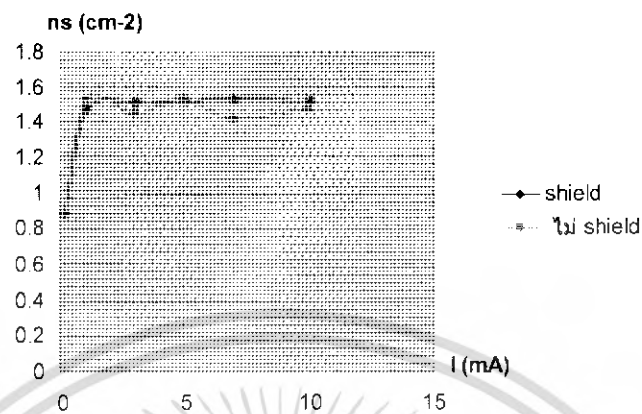
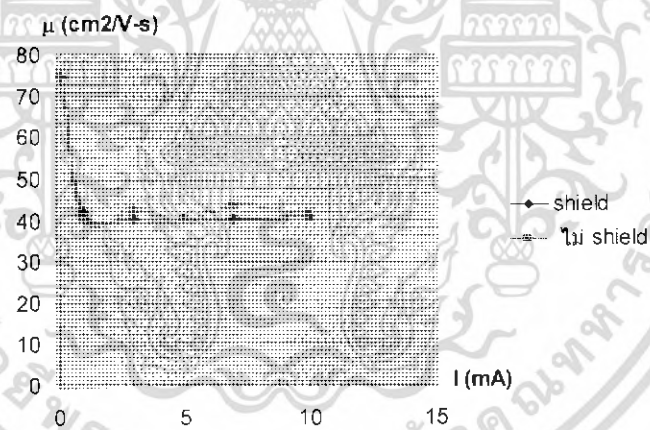
กระแส (I) mA	ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) $\Omega/\square$	ความหนาแน่นของ พาหะ ( $n_s$ ) $\text{cm}^{-2}$	สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
0.1	9.39	$0.882 \times 10^{16}$	75.4
1	10.1	$1.53 \times 10^{16}$	40.6
3	10.1	$1.45 \times 10^{16}$	42.6
5	10.1	$1.53 \times 10^{16}$	40.3
7	10.1	$1.42 \times 10^{16}$	43.4
10	10.1	$1.48 \times 10^{16}$	41.7

ตารางที่ 4.3 ค่า ( $R_s$ ,  $n_s$ ,  $\mu$ ) แบบไม่ได้ shield ด้วย Aluminium foil



รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $R_s$  แบบ shield กับที่ไม่ได้ shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

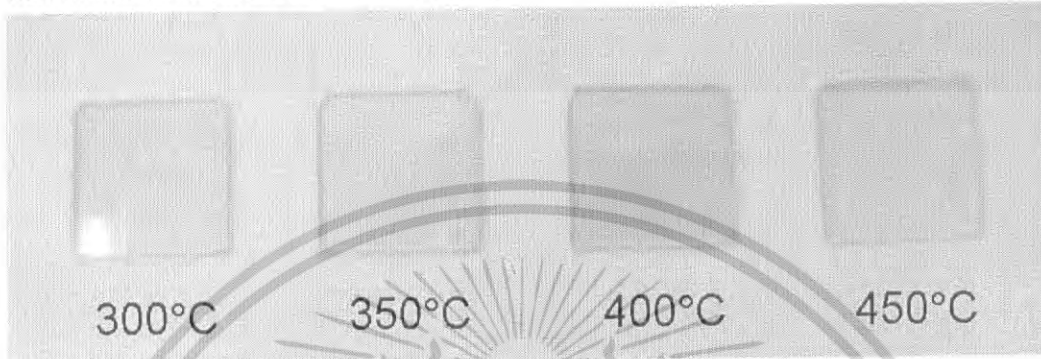
เปรียบเทียบค่า  $n_s$  แบบ shield กับที่ไม่ได้ shieldรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $n_s$  แบบ shield กับที่ไม่ได้ shieldเปรียบเทียบค่า  $\mu$  แบบ shield กับที่ไม่ได้ shieldรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $\mu$  แบบ shield กับที่ไม่ได้ shield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

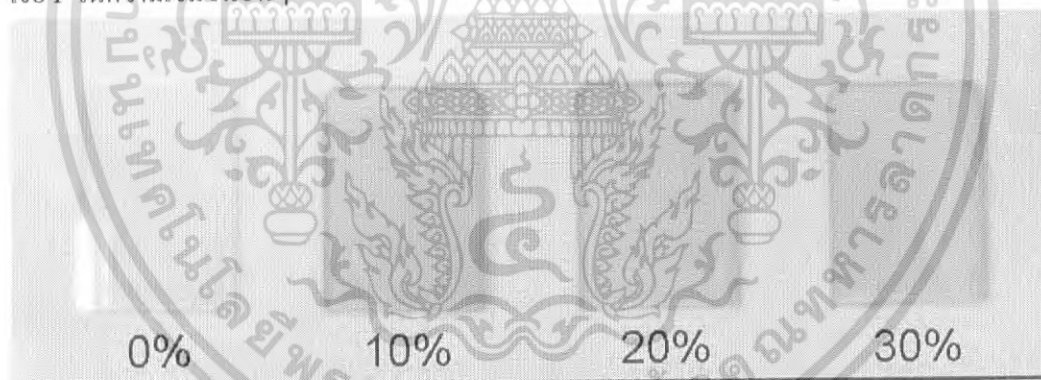
### 4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ที่เจือ F 10% ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีสีขาวใสค่อนข้างเท่ากัน



รูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C

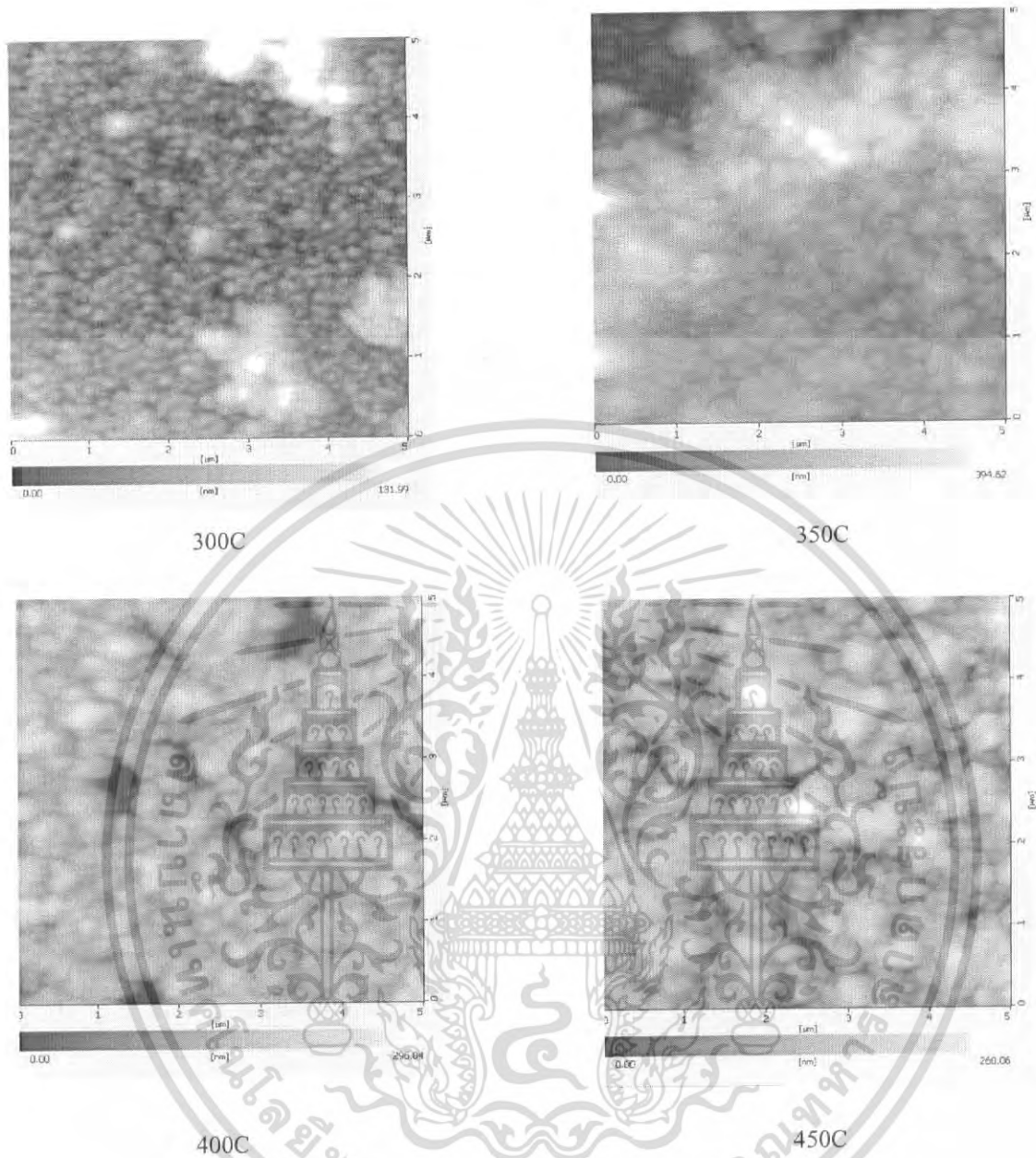
จากการสังเกตฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ที่เจือ F ในความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 400°C โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสพบว่าฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ที่เจือ F ในความเข้มข้น 0% มีสีขาวใสกว่าฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ที่เจือ F ในความเข้มข้นอื่นๆ



รูปที่ 4.8 ฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่เจือ F ในความเข้มข้น 0%, 10%, 20%, 30%

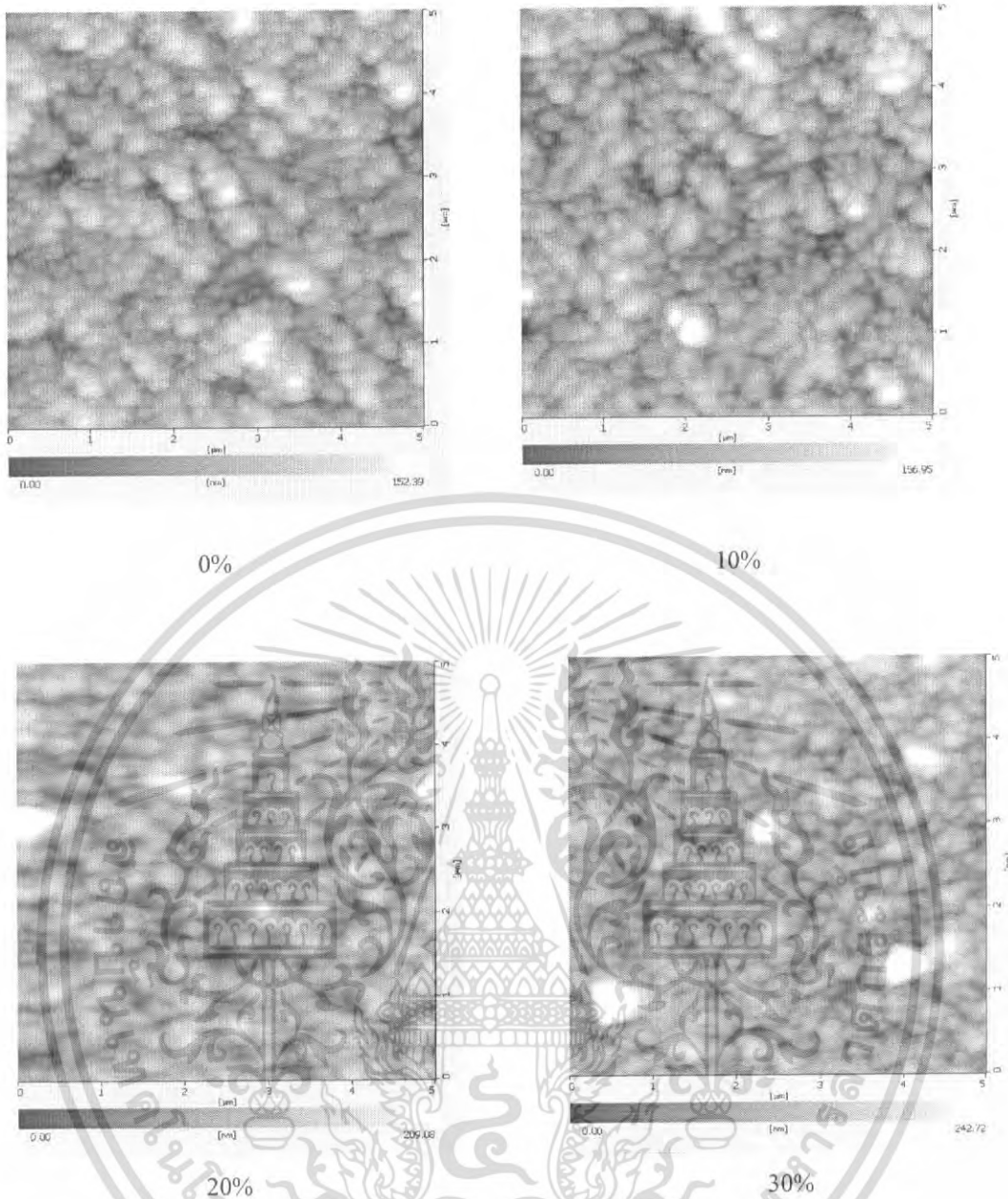
### 4.2.2 ผลการศึกษาสภาพพื้นผิว

จากการศึกษาพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM ของ ฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  พบว่าที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C พื้นผิวของฟิล์มบางนั้นไม่สม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิ 400°C มีความสม่ำเสมอมากที่สุด



รูปที่ 4.9 แสดงรูปพื้นผิวของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$ ,  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



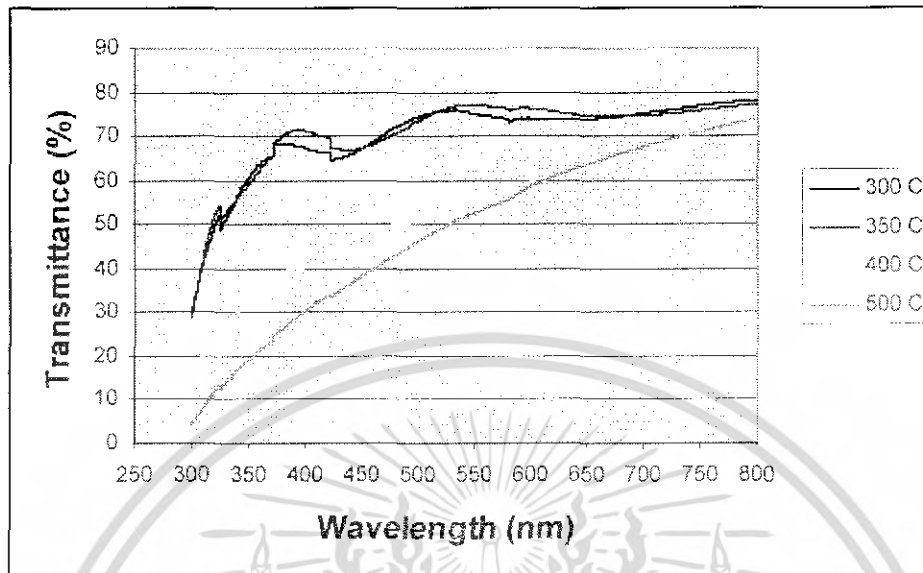
รูปที่ 4.10 แสดงรูปพื้นผิวของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%

#### 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสง

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  โดยใช้เครื่อง AFM โดยเลือกความยาวคลื่นในช่วง 300-800 นาโนเมตร เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$ ,  $350^\circ\text{C}$  มีค่า 77-78 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

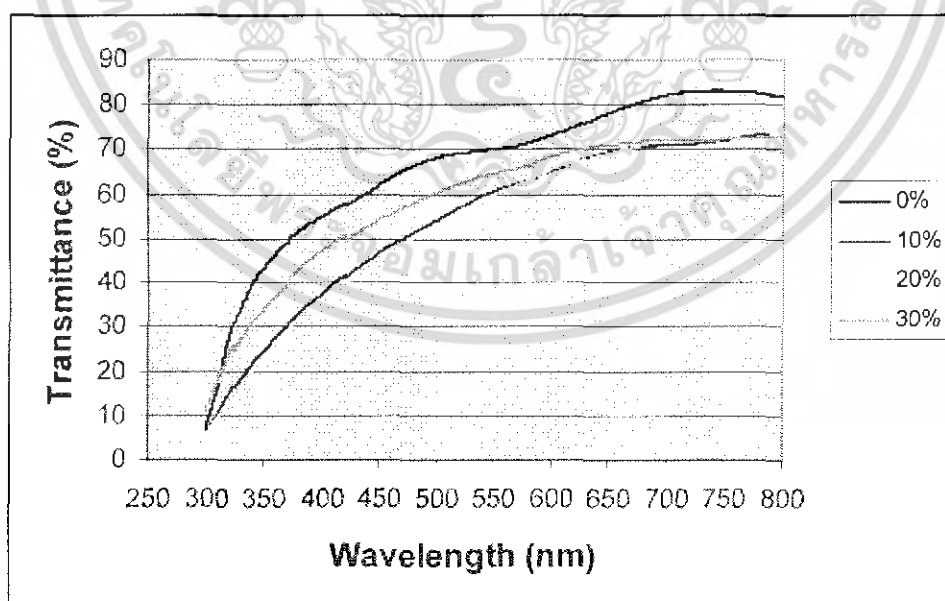
เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub> ที่เจือ F 10% ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub>:F ที่อุณหภูมิต่างๆ

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub>:F โดยใช้เครื่อง AFM โดยเลือกความยาวคลื่นในช่วง 300-800 นาโนเมตร เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงสูงสุดเมื่อเจือ F ที่ความเข้มข้น 0% มีค่าเท่ากับ 81.9%

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub> ที่เจือ F ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnO<sub>2</sub>:F ที่เจือ F ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลจากกราฟการส่งผ่านแสงมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

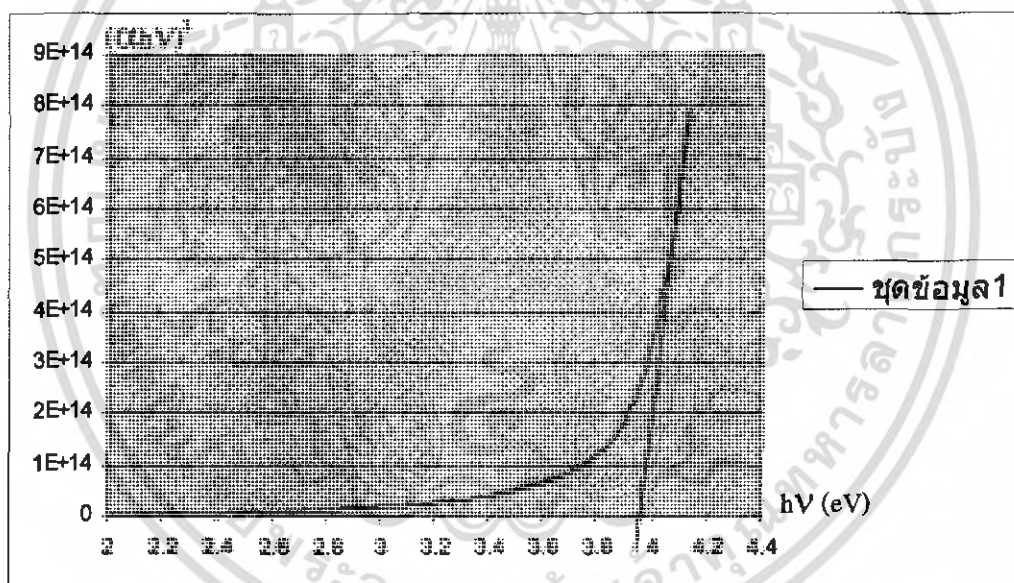
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{T}\right)$$

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม

$T$  คือ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน

แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพลังงานโฟตอน ( $\alpha h\nu$ )<sup>2</sup> กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) แล้วสามารถหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap:  $E_g$ ) ได้จากการลากเส้นตรงส่วนที่แสดงกราฟเชิงเส้นไปตัดแกนพลังงานโฟตอน โดยจุดตัดกราฟที่ได้คือขนาดของช่องว่างแถบพลังงานดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ที่ไม่เจือ F จะมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.95eV (ความหนาอ้างอิงมาจาก A.Tucic, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 41–45)



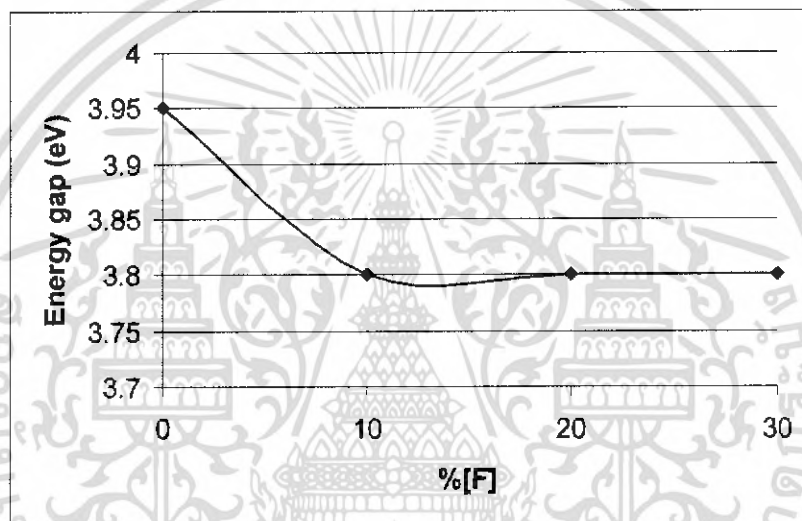
รูปที่ 4.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$ :F

Sample	Energy gap (eV)
$\text{SnO}_2$	3.95
$\text{SnO}_2$ :F ([F]=10%)	3.8
$\text{SnO}_2$ :F ([F]=20%)	3.8
$\text{SnO}_2$ :F ([F]=30%)	3.8

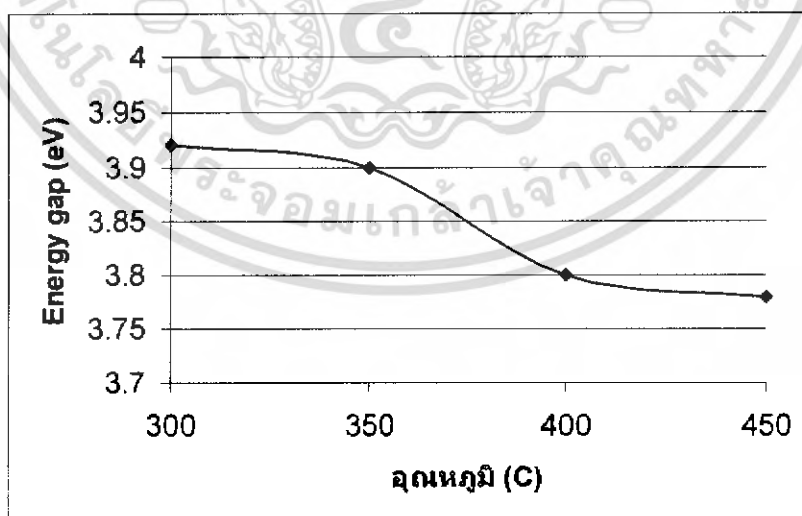
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Energy gap (eV)
300°C	3.92
350°C	3.9
400°C	3.8
450°C	3.78

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$



รูปที่ 4.14 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่ %F ต่างๆ



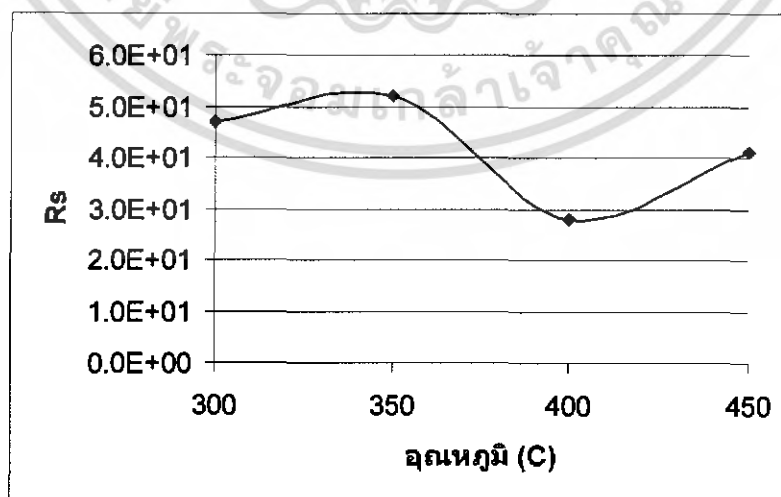
รูปที่ 4.15 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

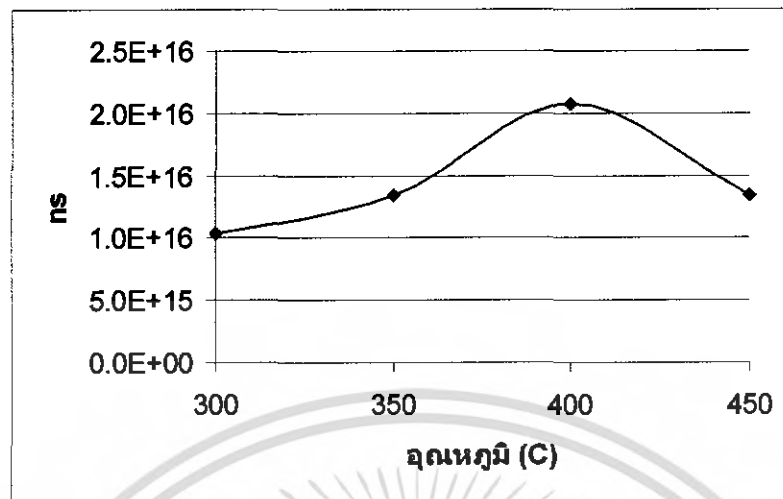
Sample	$R_s (\Omega/\square)$	$n (\text{cm}^{-2})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1})$
อุณหภูมิ 300°C	4.68E+01	1.03E+16	1.73E+01
อุณหภูมิ 350°C	5.19E+01	1.34E+16	9.00E+00
อุณหภูมิ 400°C	2.79E+01	2.08E+16	1.07E+01
อุณหภูมิ 450°C	4.12E+01	1.34E+16	1.13E+01
ความเข้มข้น F = 0%	1.20E+02	2.99E+15	1.74E+01
ความเข้มข้น F = 10%	1.89E+01	2.88E+16	1.15E+01
ความเข้มข้น F = 20%	2.14E+01	2.24E+16	1.21E+01
ความเข้มข้น F = 30%	2.17E+01	1.74E+16	1.65E+01

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า  $R_s$ ,  $n$ ,  $\mu$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$

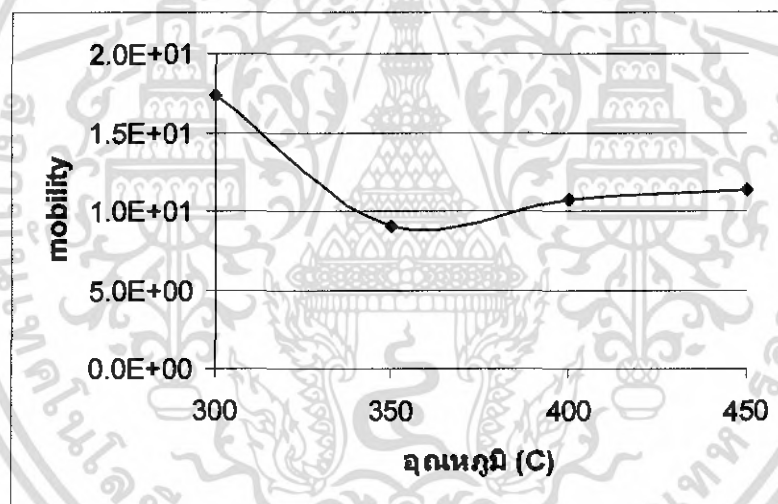


รูปที่ 4.16 แสดงค่า  $R_s$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

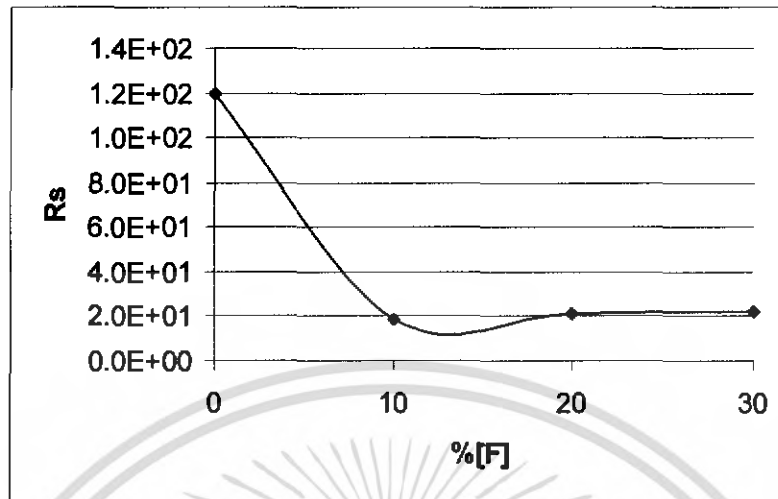


รูปที่ 4.17 แสดงค่า  $n_s$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C

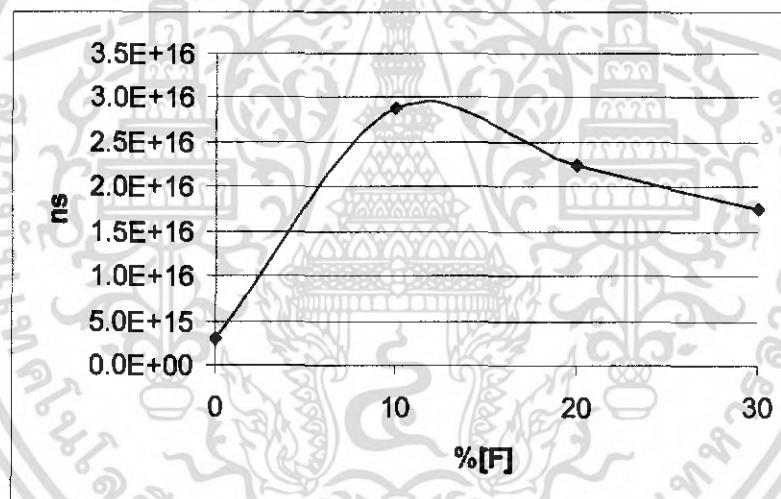


รูปที่ 4.18 แสดงค่า  $\mu$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่อุณหภูมิ 300°C, 350°C, 400°C, 450°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

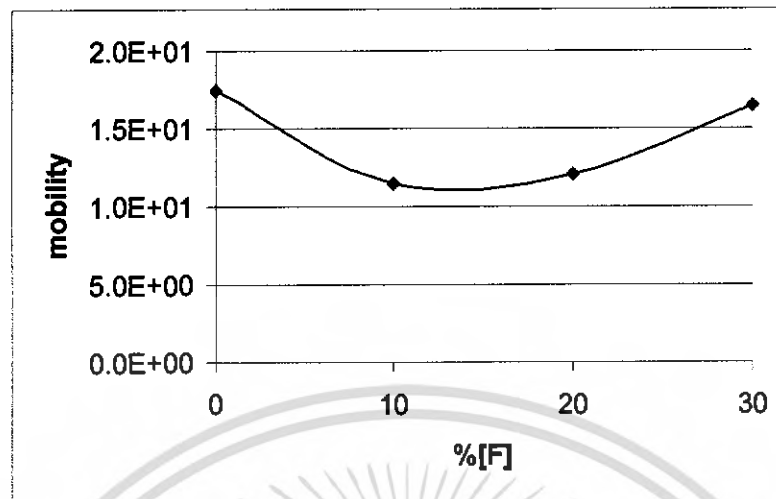


รูปที่ 4.19 แสดงค่า  $R_s$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%



รูปที่ 4.20 แสดงค่า  $n_s$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงค่า  $\mu$  ของฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2:\text{F}$  ที่เจือ F 0%, 10%, 20%, 30%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สรุปการทดลองของการวัดฮอลล์ จากการทดลองแบบใช้กาวเงิน (Ag-paste) และแบบใช้โพรบ (probe) ที่ใช้กระแสต่างกัน เพื่อดูว่ามีผลอะไรกับค่าความต้านทานแผ่น, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ซึ่งเห็นได้ว่ากระแส (1-10 mA) จะมีค่าความต้านทานแผ่น, ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้าใช้กระแส (0.1 mA) ที่ห่างจากค่ากระแสที่คำนวณมา จะมีผลให้ค่าต่างๆผิดเพี้ยนไปเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง แบบ shield และไม่ได้ shield ซึ่งแบบไม่ได้ shield จะมีค่า  $n, \mu$  ไม่คงที่

สรุปการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ จากเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $350^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $450^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ความเข้มข้น F 10% พบว่าที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  กับ  $350^{\circ}\text{C}$  พื้นผิวของฟิล์มบางนั้นไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อสังเกตพื้นผิวที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  จะมีความสม่ำเสมอมากที่สุด และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$  กับ  $350^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่า 77-78 % และที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  มีค่าความต้านทานแผ่นต่ำสุดคือ  $2.79 \times 10^1 \Omega/\square$  และความหนาแน่นพาหะแผ่นสูงสุดคือ  $2.08 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

สรุปการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ จากเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ F ( $\text{NH}_4\text{F} / \text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็น 0%, 10%, 20%, 30% โดยน้ำหนักของ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เมื่อเจือ F ที่ความเข้มข้น 0% ผลึกจะมีลักษณะกลม แต่เมื่อเจือ F ผลึกจะมีลักษณะรีซึ่งอาจเกิดมาจากอะตอมของฟลูออรีน และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงสูงสุดเมื่อเจือ F ที่ความเข้มข้น 0% มีค่าเท่ากับ 81.9% และฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  เจือ F ที่ 10% ให้ค่าความต้านทานแผ่นต่ำสุดคือ  $1.89 \times 10^1 \Omega/\square$  และให้ค่าความหนาแน่นพาหะแผ่นสูงสุดคือ  $2.08 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

## หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 275 หน้า, 2544
2. ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ “เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 1-2 หน้า
3. Semiconductor Electronics Division, EEEL “Hall Effect Measurements”, [www.eee.nist.gov](http://www.eee.nist.gov), 2001
4. A.Tucic, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 41–45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้