

การเตรียมฟิล์มบางของโลหะออกไซด์โดยวิธีการระเหยความร้อนในสุญญากาศ  
การในระบอบสุญญากาศ  
PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY THERMAL  
EVAPORATION IN VACUUM

นางสาววรรณิศา ศรีโตสง

โครงการสนับสนุนงานวิจัยส่วนหนึ่งของคณะกรรมการพัฒนาการศึกษาขั้นสูง มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช  
สาขาวิชาศึกษาศาสตร์  
คณะศึกษาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน  
ภายในระบบสุญญากาศ

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY THERMAL  
EVAPORATION IN VACUUM

นางสาววรรณิตา ศรีโสดา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

**PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY THERMAL  
EVAPORATION IN VACUUM**

**Miss WANNISA SRISODA**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY THERMAL EVAPORATION IN VACUUM

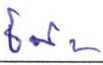
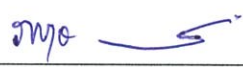


ชื่อนักศึกษา นางสาววรรณิศา ศรีโสดา

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
อ.ภารุจ บัณฑิตาควิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

ลิขสิทธ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
ชื่อนักศึกษา	นางสาววรรณิสา ศรีโสภา
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เป็นแบบ โมโนคลินิก ที่มีการจัดเรียงตัวของระนาบ (-111) และ (111) อย่างโดดเด่น จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มบางที่ยังไม่ได้แอนนัลจะมีเกรนขนาดเล็กที่จับตัวกันแน่น สำหรับฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลแล้วเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่จับตัวกันไม่แน่น แสดงให้เห็นว่าขนาดของเกรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงขึ้น ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ทั้งที่ไม้ได้แอนนัลและที่แอนนัลแล้วโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พารามิเตอร์ที่สำคัญทางไฟฟ้าของฟิล์มบางมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัล ซึ่งคำนวณได้จากการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO, โครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิก, การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

<b>Title</b>	PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY THERMAL EVAPORATION IN VACUUM
<b>Student</b>	Miss.Wannisa Srisoda
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

### ABSTRACT

In this special project, CuO thin films were deposited by thermal evaporation in vacuum onto glass substrate with heating the substrate at 100 °C. Then, the as-deposited films were thermally annealed in air in the temperature range of 100-500 °C for 1 hour. X-ray diffraction studies suggest that, for CuO thin films, the structure was found to be monoclinic with preferential orientation along the (-111) and (111) plane. The SEM micrographs of the as-deposited films are dense compacted smaller grains. The post-annealed films are composed of loosely compacted large grains. Grain size of the films increases when the annealing temperature increases. Resistivity and Hall effect measurements were performed on the as-deposited and annealed films with van der Pauw configuration. Important electrical parameters of the films as a function of annealed temperature were extracted from the impedance spectroscopy measurements.

**Keywords:** CuO thin films, monoclinic, XRD, SEM

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>6</b>
2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก	6
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	6
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	9
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	11
2.1.4 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์	11
2.1.5 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์	13
2.1.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{O}$ และ $\text{CuO}$	14
2.1.7 ปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน	17
2.1.8 ซ้อบกพร่องผลึก	18
2.1.8.1 ซ้อบกพร่องผลึกแบบจุด	18
2.1.8.2 ซ้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	19
2.1.8.3 ซ้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	20
2.1.8.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	21
2.1.8.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แบบส่องกราด	23
2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	25
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	26
2.2.2 การส่งผ่านแสง	29
2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	30
2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	31
2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	33
2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	33
2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	34
2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิก	36
2.3.2 การวัดความต้านทานแผ่น และสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	39
2.3.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	41
2.3.4 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	42
2.3.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์	44
2.3.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	48
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>51</b>
3.1 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	51
3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	51
3.1.2 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	52
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายใน ระบบสุญญากาศ	52
3.2 วิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ เตรียมได้ทั้งหมด โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	54

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	54
3.2.2 การศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็ก ตรอนแบบส่องกราด	55
3.2.3 การวัดการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	55
3.2.4 วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	56
3.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	56
3.2.4.2 ขั้นตอนการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	57
3.2.5 วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	58
3.2.5.1 ขั้นตอนการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	59
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>61</b>
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายใน ระบบสุญญากาศ	61
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	62
4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	63
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	65
4.5 ผลการศึกษาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิก ระหว่างฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการ แอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	83

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	85
4.7 ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	88
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	97
5.1 สรุปผลการวิจัย	97
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	101
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	102
<b>ภาคผนวก</b>	106
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และจุดตัดแกนผลึก (x, y, z)	10
2.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	82
4.2 การหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิก ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	84
4.3 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	87
4.4 ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากสองวิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	93
4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากอิมพิแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	96

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2	การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	10
2.3	การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชรของสารกึ่งตัวนำ C	11
2.4	โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs	12
2.5	โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ของสารกึ่งตัวนำ CuGaS <sub>2</sub>	14
2.6	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu <sub>2</sub> O	15
2.7	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	16
2.8	แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ Cu-O	16
2.9	ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	19
2.10	ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	19
2.11	ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	20
2.12	เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	20
2.13	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	21
2.14	ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	22
2.15	วิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	23
2.16	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
2.17	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	27
	ก. ฉนวน	
	ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์	
	ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
	ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี	
	จ. โลหะ	
	ฉ. สารกึ่งตัวนำ	
2.18	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 เคลวิน)	28
	ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
	ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสาร กึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน)	28
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.20 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	29
2.21 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน แสงกับพลังงานโฟตอน	31
2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือ ค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	33
2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ	37
2.24 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้าน ทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	40
2.25 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์ เพาว์	40
2.26 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	41
2.27 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	42
2.28 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	43
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อน ขั้วไฟฟ้า	
2.29 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	45
2.30 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มี รูปทรงใดๆ	48
2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )	49
3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	54
3.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5410LV	55
3.3 ภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การวางขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	56
3.5 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236	56
3.6 ภาพถ่ายเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Fluke รุ่น 8808A	56
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )	58
3.8 วิธีการต่อวงจรเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์	58
3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )	60
4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	62
4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	63
4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	64
4.4 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	65
4.5 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	66
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	66
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	67
4.9 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	67
4.10 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	68
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	68
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	69
4.14 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	70
4.15 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	70
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	71
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	71
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	72
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	73
4.21 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	73
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	74
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	74
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	75
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	75
4.26 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	76
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	77
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	77
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	78
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	78
4.32 การหาค่าความต้านทาน $R_1$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	79
4.33 การหาค่าความต้านทาน $R_2$ ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	80
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	80
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	81
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	81
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	82
4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	85
4.41 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	86
4.42 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	87
4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	88
4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	88
4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียไดอิเล็กตริก กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว นำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	89

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	89
4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	90
4.48 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	90
4.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	91
4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า $\omega_0$ ของกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	91
4.51 การจำลองค่าแอมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52	
วงจรมุมที่ใช้เป็นแบบจำลอง ในการอธิบายถึงการวัดค่าค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมายจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งมาตรการต่างๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาพลังงานใหม่ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด พบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหิน ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากขึ้น นั้นเราก็จำเป็นต้องพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI<sub>2</sub> เช่น CdTe, CdS, CuInSe<sub>2</sub> และ CuInGaSe<sub>2</sub> เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu<sub>2</sub>S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ได้รับการวิจัยและพัฒนากันหลากหลาย เช่น p - Cu<sub>2</sub>O/n - ZnO, p - Cu<sub>2</sub>O/n - CuO, CuO/ZnO และ p-CuO/n-Si เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาข่อมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้มีการสนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคิวปริคออกไซด์ (CuO) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน(E<sub>g</sub>) ประมาณ 1.35 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มี

ข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ไม่เป็นสารพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพีและเอ็น เป็นผลให้มีการนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโต โวลตาอิก ผิวนเคลือบอิเล็กทรอนิกส์ ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี เป็นต้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum thermal evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันจากโลหะ (oxidation of metals) วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam heated source) และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี (electroplating) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยการให้ความร้อนเพื่อระเหยสารเคมีให้ขึ้นไปเกาะติดบนแผ่นฐานรองรับ (substrate) ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีนี้จะใช้เวลาในการเตรียมน้อย และทำการเตรียมได้ครั้งละมากๆ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีหลายวิธี เช่น ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction spectroscopy : XRD) ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron-microscopy : SEM) การตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) และตรวจสอบโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งวิธีการต่างๆเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่ถูกเตรียมขึ้น เพื่อป้อนกลับไปสู่การเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดีขึ้น และประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้เคลือบไปลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.2.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,000 นาโนเมตร และหาค่า

ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

- 1.2.4 ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง

### 1.3 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลการวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
- 1.3.2 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.3.3 ทำการแอนนิลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน  $Cu_{K\alpha}$  มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ และศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5410LV โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์
- 1.3.5 ทำการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,000 นาโนเมตร และหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO
- 1.3.6 ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.3.8 จัดทำรูปเล่มโครงงานพิเศษ

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.4.2 ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 1.4.3 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.4.4 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,000 นาโนเมตร และหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO
- 1.4.5 ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิห้อง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงขั้นตอนการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการพิเศษ
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้ ได้แก่ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ และการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์

- 1.5.4 ทำให้ทราบถึงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จาก  
การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- 1.5.5 ทำให้ทราบถึงวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์  
เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.5.6 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของ  
การแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

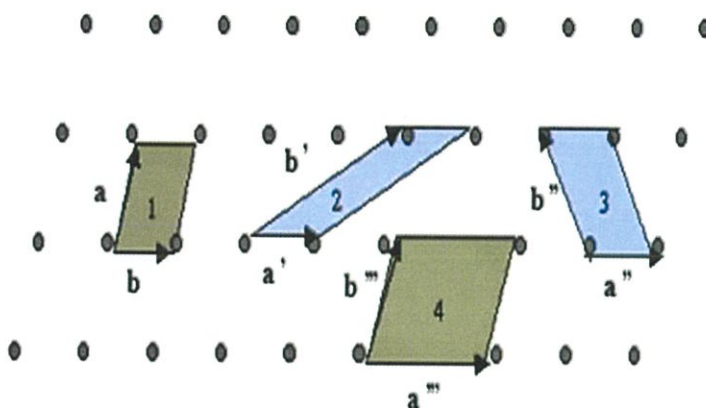
สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วย เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ต่อไป

### 2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

#### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



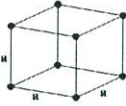
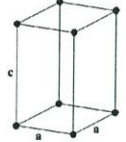
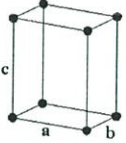
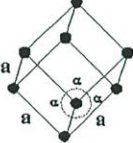
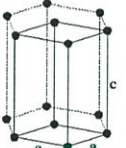
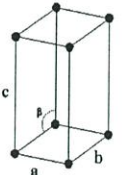
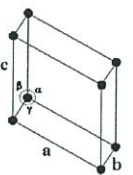
รูปที่ 2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	มุม(องศา)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน $60^\circ$ ( $60^\circ$ rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  และ  $\bar{c}$  และ มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
<p>คิวบิก (cubic)</p>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>เตตระโกนัล (tetragonal)</p>	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)</p>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)</p>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
<p>เฮกซะโกนัล (hexagonal)</p>	$a = b \neq c$ $\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
<p>โมนอคลินิก (monoclinic)</p>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
<p>ไตรคลินิก (triclinic)</p>	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; จูตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลัง ศึกษาอยู่นั้น

### หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

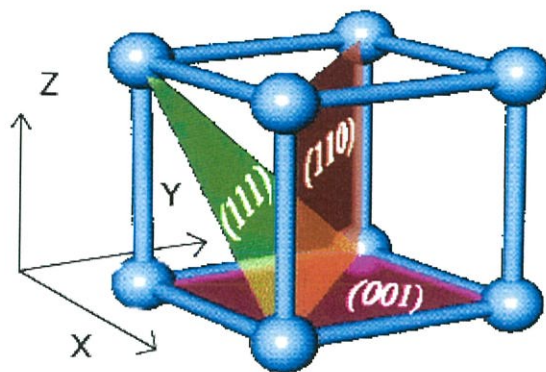
#### การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x, y, z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งกั้นแต่ละค่า ตัวอย่าง จุด  $(1, 2, 3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$  การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มี เครื่องหมาย “,” กั้นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}2\bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่า เป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(h\ k\ l)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มี เครื่องหมาย “,” กั้นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “-” หรือบาร์ ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า  $h\ k\ l$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น  $(x, y, z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใด ให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์  $(h\ k\ l)$  ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะ ตัด แกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และจุดตัดแกนผลึก (x, y, z)

จุดตัดแกนผลึก (x, y, z)	ส่วนกลับของจุดตัดบนแกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	(010)
-1, 1, 1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	( $\bar{1}$ 11)
-1, -1, -1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$	( $\bar{1}$ $\bar{1}$ $\bar{1}$ )
0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$	(224)
0.5, 0.5, $\infty$	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

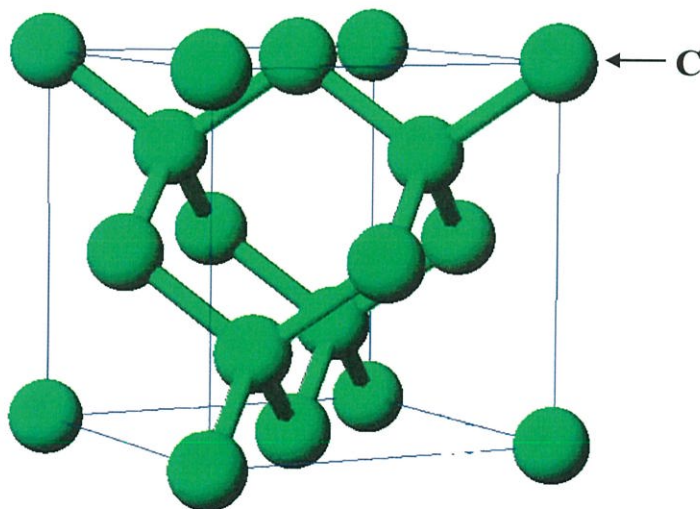
$$l = -(h+k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ( $11\bar{2}$ ) ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกัน นั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

**2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) (จูตินัย, 2530; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; Kittel, 1971; Runyun, 1975; Sze, 1981)**

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ  $\alpha$ -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรนี้เกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices,  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา) สองโครงผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง  $\frac{1}{4}$  ของเส้นทะแยงมุม หนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่ง  $000, \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$  แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทาง นอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้

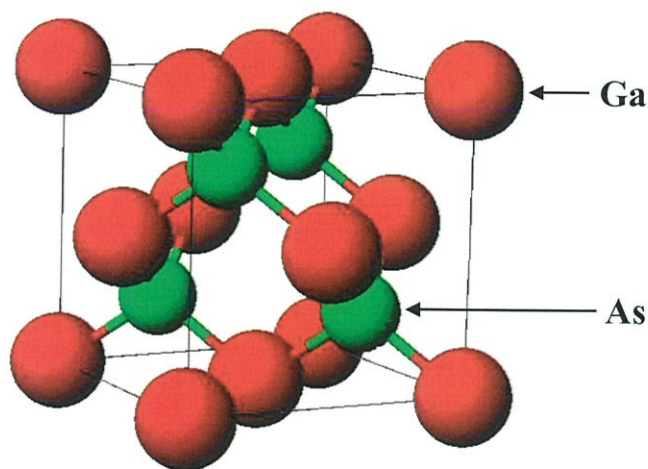


รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชรของสารกึ่งตัวนำ C

**2.1.4 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure) (จูตินัย, 2530; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; Kittel, 1971; Runyun, 1975; Sze, 1981)**

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และ II-VI เช่น สารกึ่งตัวนำ GaAs, GaSb, InSb เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร ได้จากการเอาโครงผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก 2 โครงผลึก ซึ่งมีค่าคงที่ของโครง

ผลึก  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90$  องศา มาซ้อนเหลื่อมกันแต่ต่างกันตรงที่แต่ละโครงผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกที่วางซ้อนเหลื่อมกันนั้นเป็นอะตอมของธาตุแต่ละชนิดกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วยอะตอมต่างกัน 2 ชนิด กับค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมแต่ละชนิดต่างกัน แต่อะตอมที่ปลายแขนของพันธะสี่หน้าของอะตอมแต่ละตัวยังคงเป็นอะตอมชนิดเดียวกัน ดังนั้นความยาวพันธะของแต่ละอะตอมจึงเท่ากัน โครงสร้างแบบนี้จึงยังเป็นรูปคิวบิก แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชร ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs ประกอบไปด้วย

อะตอมของธาตุ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง  $000, \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$

อะตอมของธาตุ As อยู่ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$

ปลายแขนของอะตอมของธาตุ Ga จะมีอะตอมของธาตุ As จับอยู่ 4 อะตอม และปลายแขนของอะตอมของธาตุ As จะมีอะตอมของธาตุ Ga จับอยู่ 4 อะตอมเช่นเดียวกัน

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V จะยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่ในกรณีนี้อะตอมของธาตุอื่นๆที่อยู่ในกลุ่ม III (หรือกลุ่ม V) ที่เราแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสม (เช่น อะตอมของธาตุ Ga และอะตอมของธาตุ In ในโลหะผสม  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ) จะเรียงตัวอย่างสุ่ม (random) อยู่ในโครงผลึกย่อยเฟซเซนเตอร์คิวบิกของอะตอมของธาตุกลุ่ม III

### 2.1.5 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) (จูตินัย, 2530;

งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; Kittel, 1971; Runyun, 1975; Sze, 1981)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของสารประกอบสารกึ่งตัวนำเชิงสาม ซึ่งได้แก่กลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> และกลุ่ม II-IV-V<sub>2</sub> โครงสร้างผลึกแบบนี้จริงๆ แล้วคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (ชนิดกลุ่ม II-VI และ III-V ตามลำดับ) แต่คราวนี้มีอะตอมต่างกันถึงสามชนิดและหนึ่งหน่วยเซลล์ของซาลโคไพไรท์ก็โตกว่าหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สองเท่า ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือ โครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้จากการขยายของเซลล์ของซิงค์เบลนด์ออกเป็นสองเท่าตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์ของซาลโคไพไรท์จึงเป็นสองเท่าของซิงค์เบลนด์และมีลิบหกออะตอมหรือมีลักษณะเป็นบอดีเซนเตอร์เตตระโกนัลโดยมีค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $a=b \neq c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90$  องศา ตัวอย่างเช่น สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ในโครงสร้างผลึกเพสเซนเตอร์คิวบิกอันหนึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุกลุ่ม I และ III เรียงสลับกันตามแนวแกน c และโครงสร้างผลึกอีกอันหนึ่งมีเฉพาะอะตอมของธาตุกลุ่ม VI เรียงอยู่ในหนึ่งเซลล์โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ สำหรับกรณีของกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> จะมีตำแหน่งอุดมคติของอะตอมชนิดต่างๆ อยู่ ณ จุดต่างๆ ดังต่อไปนี้

ธาตุกลุ่ม I อยู่ที่ตำแหน่ง 000

ธาตุกลุ่ม III อยู่ที่ตำแหน่ง  $00\frac{1}{2}$

ธาตุกลุ่ม VI อยู่ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{8}$

สำหรับกรณีกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ที่เป็นผลมาจากเกิดการเลือนแบบเตตระโกนัล (tetragonal distortion) จะมีจำนวนและตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้คือ

ธาตุกลุ่ม I อยู่ที่ตำแหน่ง  $000, 0\frac{1}{2}\frac{3}{4}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{4}$

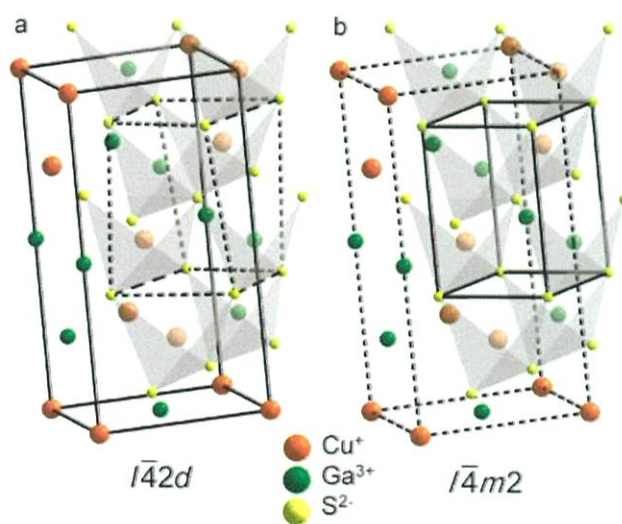
ธาตุกลุ่ม III อยู่ที่ตำแหน่ง  $00\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{4}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0, \frac{1}{2}0\frac{3}{4}$

ธาตุกลุ่ม VI อยู่ที่ตำแหน่ง  $x\frac{1}{4}\frac{1}{8}, \frac{3}{4}x\frac{1}{8}, \bar{x}\frac{1}{4}\frac{1}{8}, \bar{x}\frac{3}{4}\frac{1}{8}, x\frac{3}{4}\frac{7}{8}, \frac{1}{4}\bar{x}\frac{5}{8}, \frac{1}{4}x\frac{5}{8}$

โดยที่  $x = \frac{1}{4} + u$  และ  $\bar{x} = \frac{3}{4} + u$  และ  $u$  คือการเลือนของแอนไอออน (anion displacement) หรือการเลือนแบบเตตระโกนัล (tetragonal distortion) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของธาตุกลุ่ม VI จับกับอะตอมของธาตุกลุ่ม I และกลุ่ม III อย่างละสองอะตอมเนื่องจากเป็นอะตอมของธาตุต่างชนิดกันสามชนิด ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีจึงต่างกัน ขนาดและอำนาจแรงที่กระทำกับแอนไอออนทั้งสองระนาบด้านข้างทำให้แทนที่แอนไอออนจะอยู่กับที่ก็จะเกิดการเลือนไปโดยที่ระนาบด้านบนยุบตัวลงมาและแนวการเลือนจะเป็นไปตามระนาบ เช่น แนวแกน x (x-axis) ดังนั้นสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ สามารถสรุปสาเหตุที่เกิดการเลือนแบบเตตระโกนัลได้ดังนี้

1. ความไม่สมมาตรของแกนแคทไอออน (cation asymmetry) คือ แรงดึงดูดที่แคทไอออนกระทำต่อแอนไอออนทั้งสองข้างไม่เท่ากันจึงเป็นเหตุให้ความยาวของพันธะ (bond length) ไม่เท่ากัน จึงทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไป
2. เตตระโกนัลคอมเพรสชัน (tetragonal compression) คือ เกิดระนาบข้างบนยุบตัวลงมาทำให้ค่า  $c/a = 2$
3. การเลื่อนของแอนไอออน (anion displacement) คือ เกิดแอนไอออนเลื่อนไปตามแนวขนานกับระนาบหรือแนวแกน x (x-axis) ทำให้ค่า  $x \neq \frac{1}{4}$

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> และ II-IV-V<sub>2</sub> ก็จะมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ แต่ในกรณีนี้จะต่อมของธาตุต่างๆ ของกลุ่ม I (หรือกลุ่ม III หรือกลุ่ม VI สำหรับ I-III-VI<sub>2</sub>) ที่เราเปลี่ยนอัตราส่วนผสม จะเรียงตัวอย่างสลับในแลตทิซเหมือนกับกรณีของซิงค์เบลนด์ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ของสารกึ่งตัวนำ CuGaS<sub>2</sub>

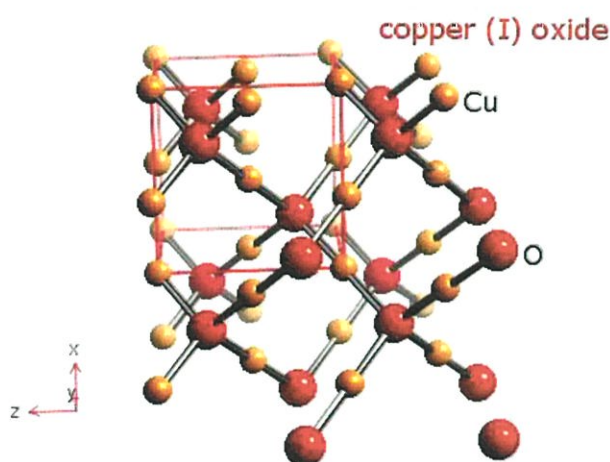


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ของสารกึ่งตัวนำ CuGaS<sub>2</sub>

### 2.1.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu<sub>2</sub>O และ CuO (Bugarinovic, 2011; จูตินัย, 2530; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; Kittel, 1971; Runyun, 1975; Sze, 1981)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu<sub>2</sub>O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากชั้นแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับชั้นแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ชั้นแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ชั้นแลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทแยงมุมของชั้นแลตทิซ แรกเป็นระยะ  $\frac{1}{4}$  ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4

อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้าน และสารกำจัดเชื้อรา สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  เคยนำไปทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si

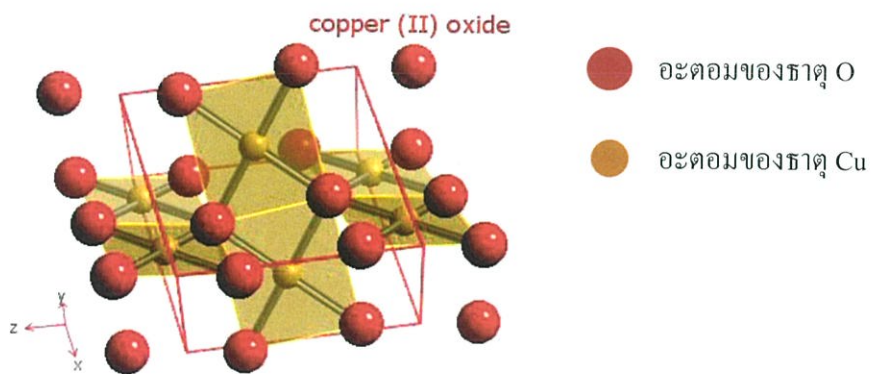


รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

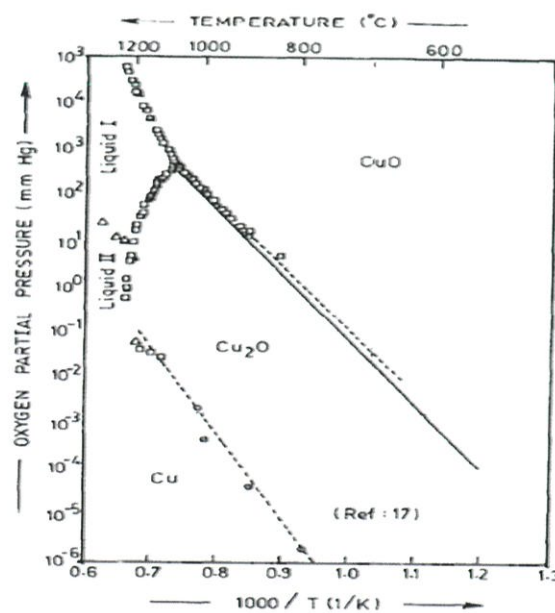
สารประกอบ  $\text{CuO}$  มีสีดำ พบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $\text{CuO}$  จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,603 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดฟอร์มิก (formic acid) ร้อนและละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด เป็นต้น สารประกอบ  $\text{CuO}$  สามารถสลายตัวเป็น สารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชันนี้ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะของธาตุ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ CuO มีสีดำ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจรู้แก๊สชนิดต่างๆ และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะ ใช้กำจัดเขม่าและเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ  $3d^9$  ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ Cu-O ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศ เฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ CuO



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO

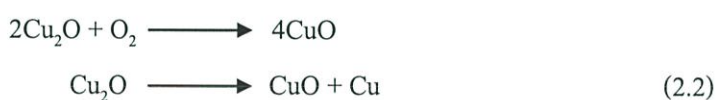


รูปที่ 2.8 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ Cu-O

### 2.1.7 ปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal Oxidation) (จูตินัย, 2530;

งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; Kittel, 1971; Runyun, 1975; Sze, 1981)

ผลึกพหุพันธ์ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  สามารถเกิดได้จากปฏิกริยาออกซิเดชันของโลหะของธาตุ Cu โดยอาศัยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 1,273-1,773 เคลวิน และในช่วงเวลานานหลายนาทิจนถึงหลายชั่วโมงขึ้นอยู่กับความหนาของสารตั้งต้น มุขาและเพื่อนร่วมงาน (Musa et al., 1998) ทำการเตรียมสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ด้วยปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนในเตาเผาที่ความดันบรรยากาศปกติ โดยใช้แผ่นโลหะของธาตุ Cu เป็นสารตั้งต้น ใช้อุณหภูมิในช่วง 473-1,323 เคลวิน พบว่าเฟสของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  เกิดขึ้นก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเฟสของสารประกอบ CuO ตามมาภายหลัง การเกิดเฟสของสารประกอบ CuO จากปฏิกริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,273 เคลวินสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.2)



สำหรับเฟสของสารประกอบ CuO ที่ไม่ต้องการ สามารถที่จะกำจัดออกได้โดยการกัดออกด้วยสารละลายของ FeCl, HCl และสารละลายของ  $\text{HNO}_3$  กับ NaCl ฟิล์มบางที่เกิดจากปฏิกริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,323 เคลวิน พบว่าเป็นเฟสเดี่ยวของของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  โดยการตรวจสอบด้วย XRD และ SEM ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเป็นเฟสผสมของของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  และสารประกอบ CuO เสมอ แสดงว่ายิ่งอุณหภูมิของปฏิกริยาออกซิเดชันมีค่าต่ำลง ปริมาณของเฟสของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งลดลงด้วย จากข้อบ่งชี้ทางอุณหพลศาสตร์ระบุได้ว่า การระงับเฟสของสารประกอบ CuO ไม่ให้เกิดร่วมกับเฟสของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  อยู่ที่อุณหภูมิ 1,313 เคลวิน ปฏิกริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเฟสของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ขึ้นก่อน จากนั้นจะค่อยๆ กลายเป็นของสารประกอบ CuO โดยขึ้นกับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ ฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยยังไม่ได้แอนนัลจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูงในระดับ  $2 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร และสภาพคล่องของพาหะมีค่าประมาณ 75 ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที) แต่เมื่อนำไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซ HCl เพื่อทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cl สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงและสภาพคล่องของพาหะจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที) จากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่า การแอนนัลส่งผลให้เนื้อฟิล์มแน่นขึ้นและเกรนมีขนาดโตขึ้น ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

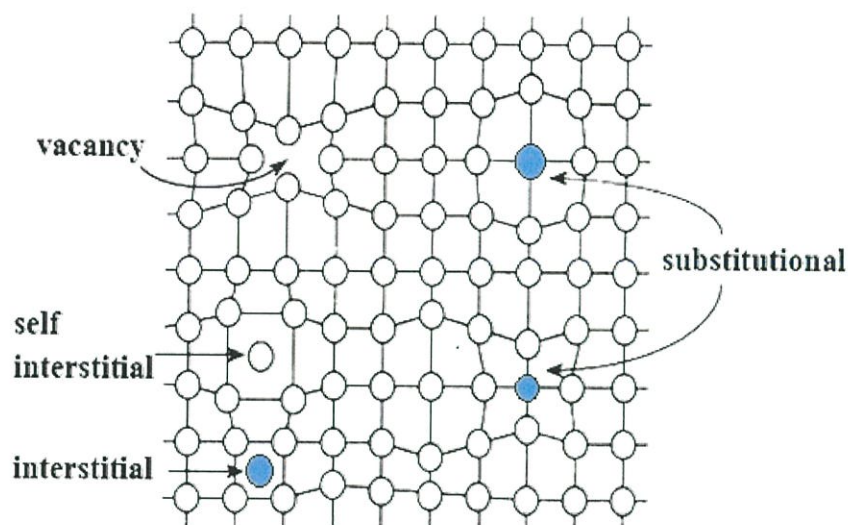
### 2.1.8 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จิตินัย, 2551)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้วความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

#### 2.1.8.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.9 นี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

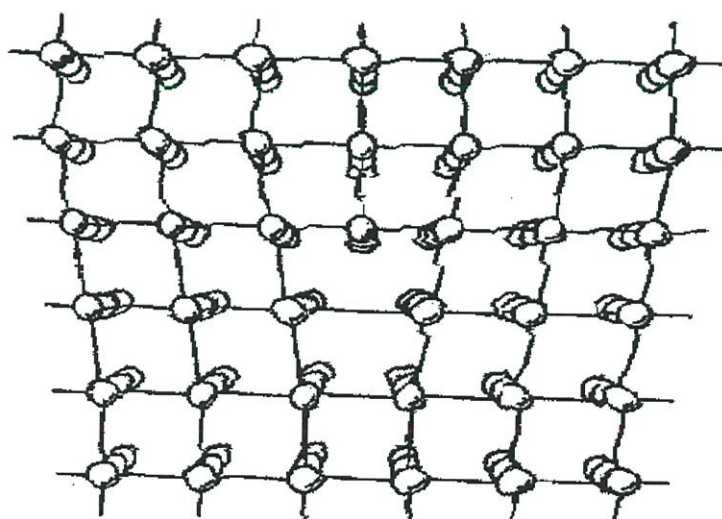
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ



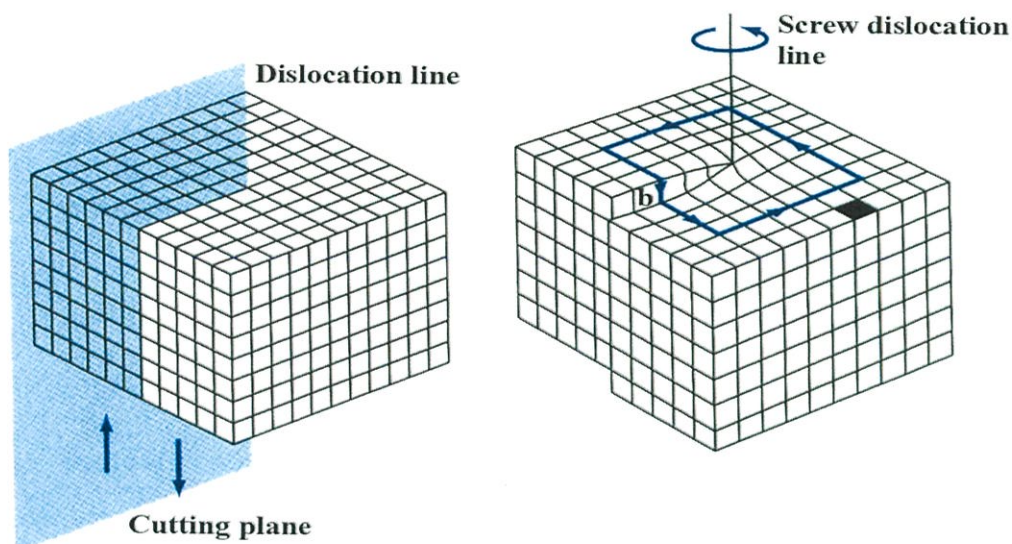
รูปที่ 2.9 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ

#### 2.1.8.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน (dislocations) เกิดจากความผิดปกติแบบจุด โครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.10 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

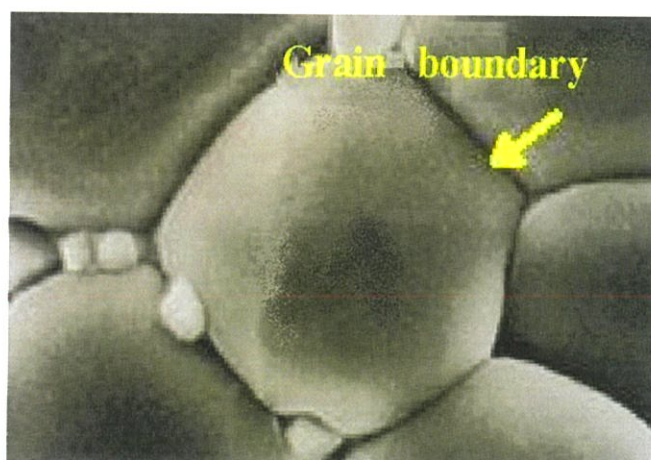


รูปที่ 2.11 ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

### 2.1.8.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดปกติ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.12 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

#### 2.1.8.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel,

1971; งามนิทย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; จูตินัย, 2551)

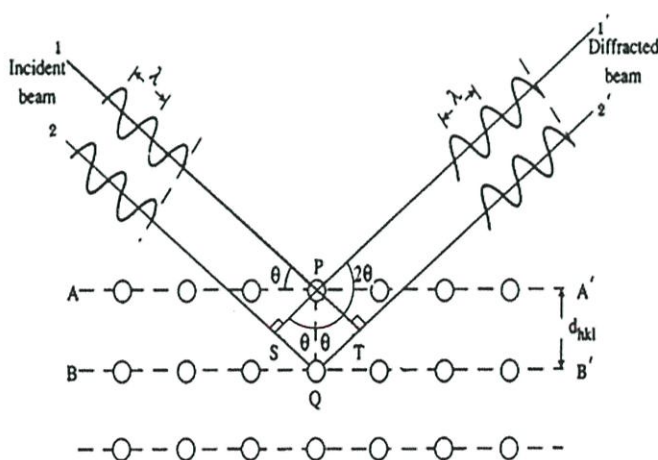
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็น ชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการที่ (2.3)

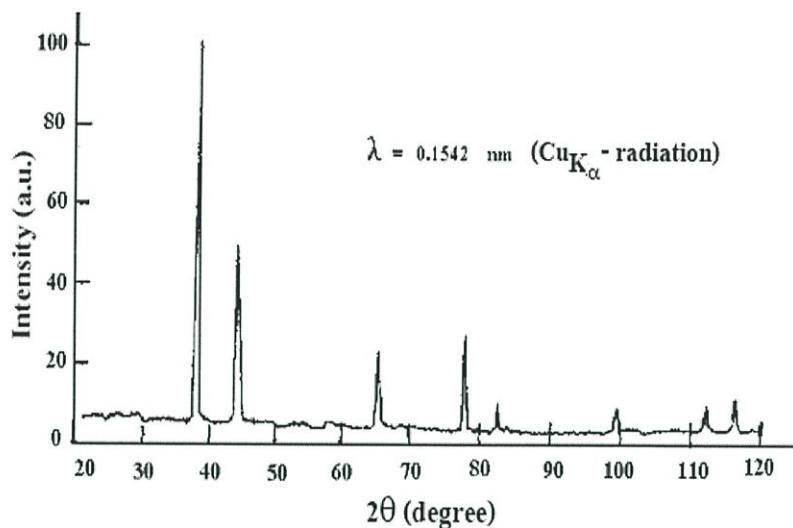
$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ  
 $\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ  
 $n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ ( $2\theta$ ) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

รูปที่ 2.14 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ต่างกัน สังเกตได้จากพิก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

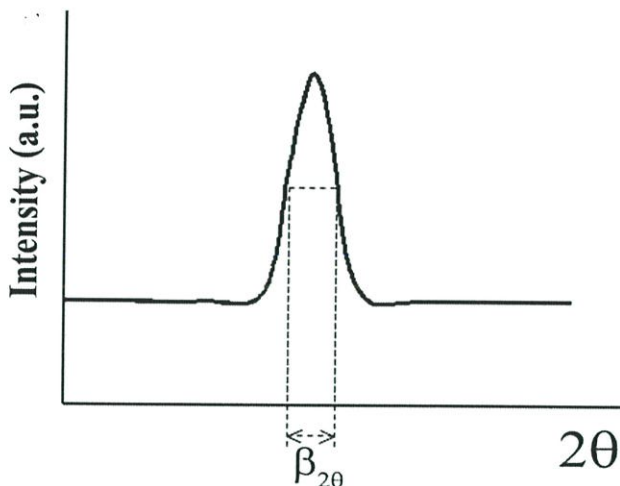
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ (2.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.4)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการ (2.5)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[ \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก  
 $h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.15 วิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารูปที่ 2.15 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) และค่าความเครียด (strain) ได้จากสมการ

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + \frac{\epsilon \sin \theta}{\lambda} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน

$\beta_{2\theta}$  คือ ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

$\epsilon$  คือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในผลึก

#### 2.1.8.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

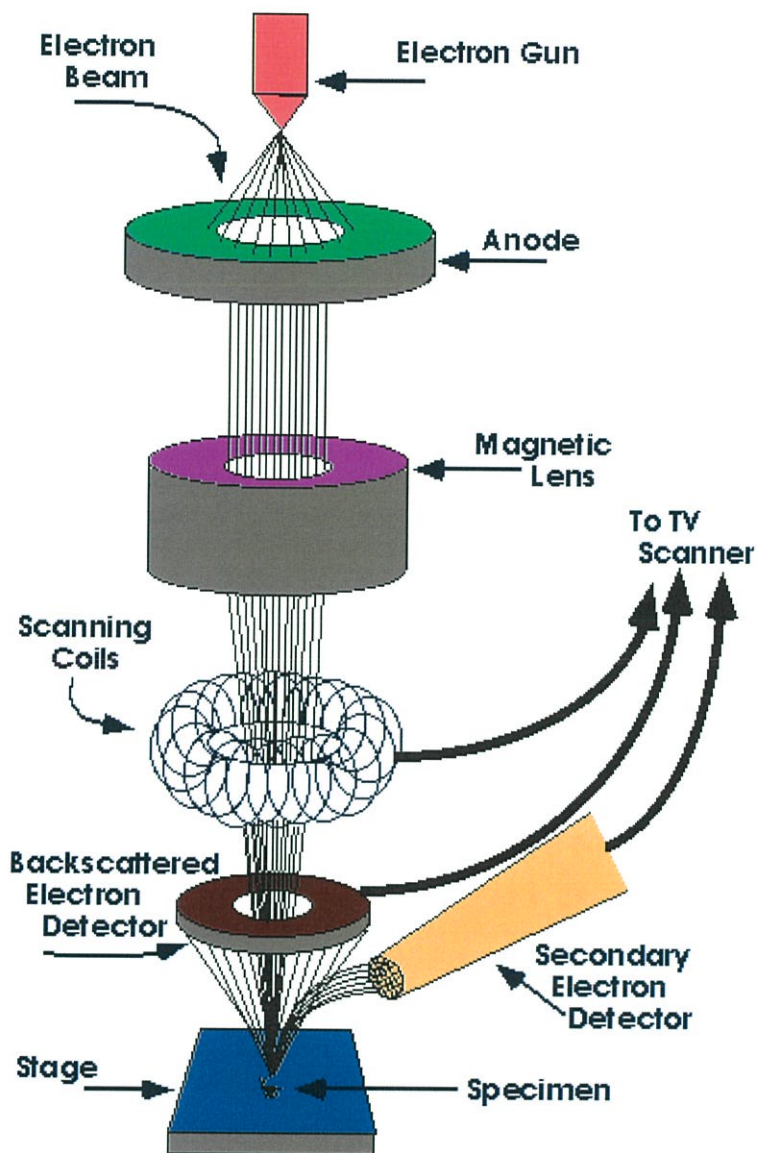
(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551; Hearle, 1973)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม เอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
-easy	5 $\mu\text{m}$	0-2 $\mu\text{m}$
-skilled	0-2 $\mu\text{m}$	10 nm
-special	0-1 $\mu\text{m}$	0-5 nm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
-transmission	Yes	Yes
-refraction	Yes	Yes
-diffraction	Yes	Yes
-other	Some	Many
Field of view	Small	Large enough
Signal	Only as image	Available for processing
Cost	Low	High

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.16 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวกซ์-เวกซ์ เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

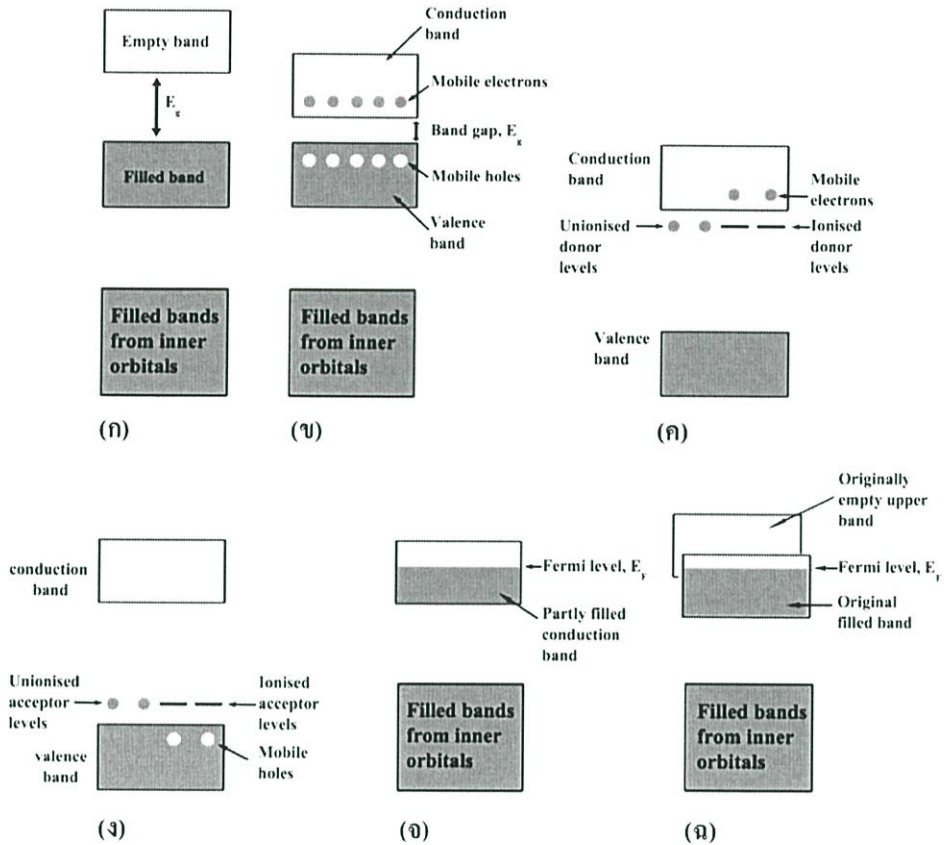
## 2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ตามลำดับ

### 2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อัน 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็น ฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบบาง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข) จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกและจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่างลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้วอะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.17 (จ) และเรารู้ได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ ในรูปที่ 2.17 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบบางที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบบางได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $\hbar\omega = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก)

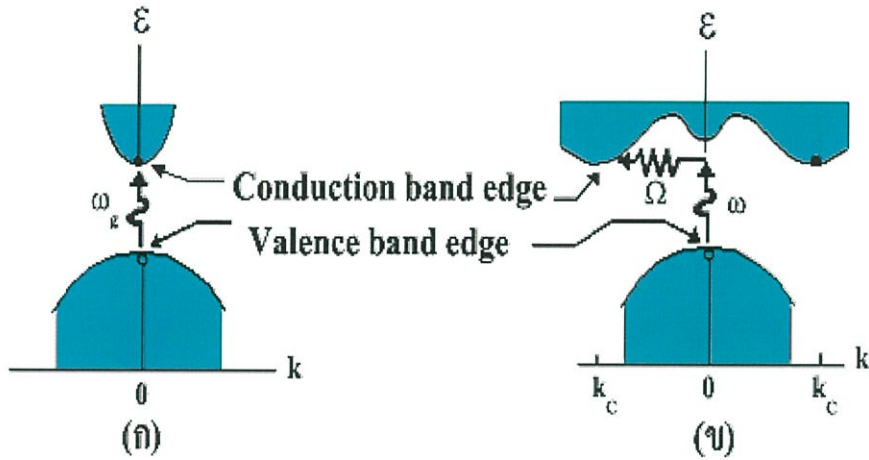


รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

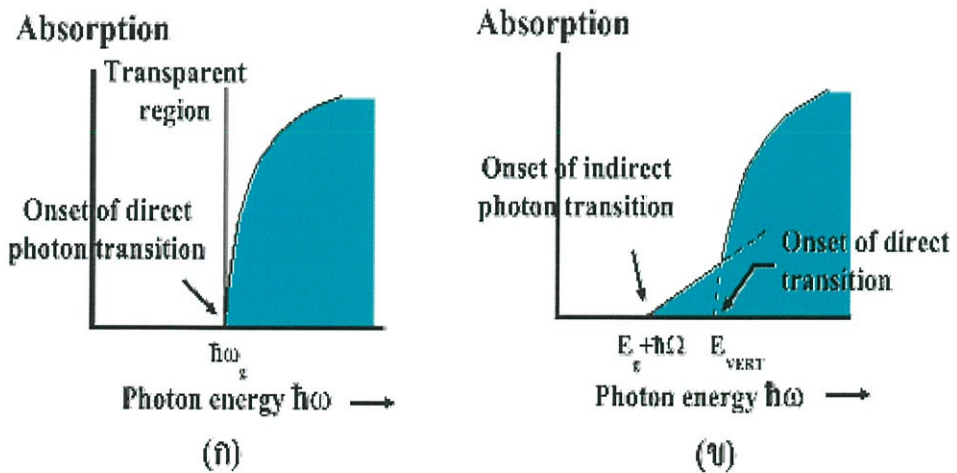
- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted

phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g = \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{VERT}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดง ในรูปที่ 2.19 (ข)



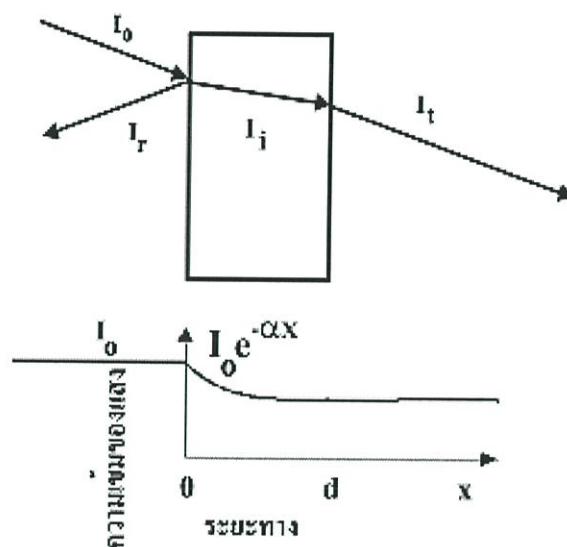
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)  
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)  
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

### 2.2.2 การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	$I_t$	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	$I_i$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1-R) I_0 \quad (2.8)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

### 2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (จามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดย

$$T+A+R = 1 \quad (2.11)$$

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.12)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n = n - iK \quad (2.13)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนจริง
	K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

#### 2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

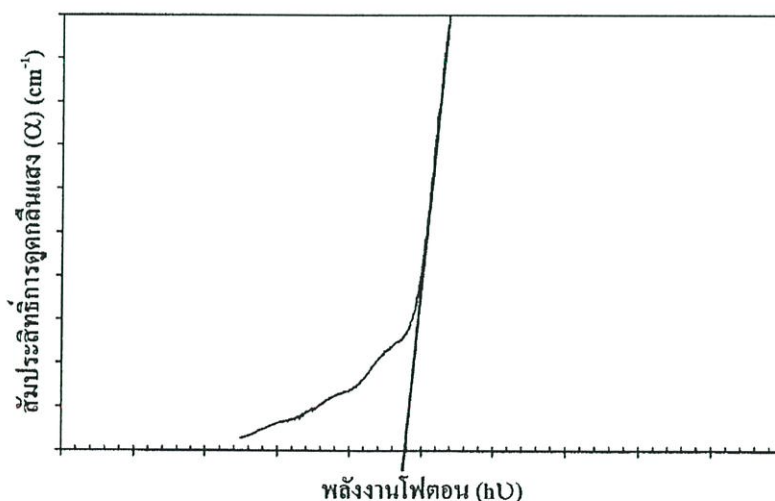
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.19 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.21 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

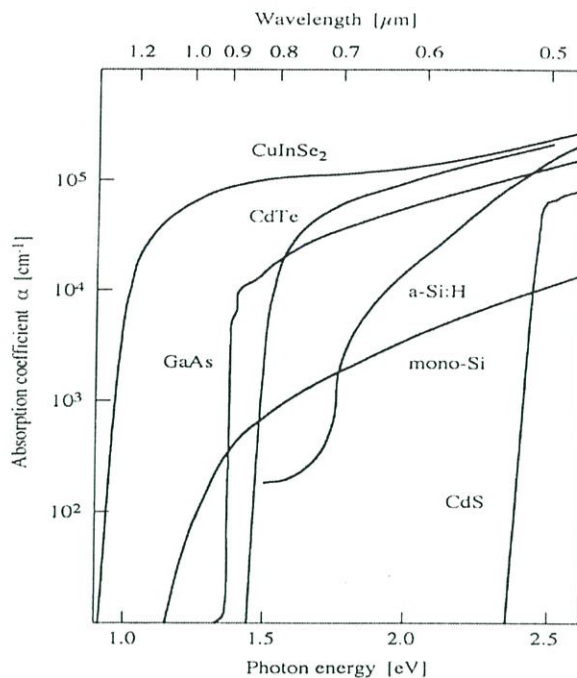
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.17)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.18)$$

เมื่อ	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	$h\nu$	คือ	พลังงานโฟตอน
A, B และ C		คือ	ค่าคงตัว



รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

### 2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975; van der Pauw L.J., 1958; วีรัชย์, 2547; สุกฤษฎ์, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; คูสิต, 2535; คูสิต, 2542; Sze, 1981)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะและความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

#### 2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำเพิ่มขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือและอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนการกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.19)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.19)$$

- เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน  
 ในระดับพลังงาน  $E$  ที่ อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ
- $E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)
- $k$  คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant)  $= 1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน
- $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

### 2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_c(E) dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิใด ๆ คือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.20)$$

เมื่อ  $N_c$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว

$$N_c(E) = 2\pi \left( \frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.21)$$

- เมื่อ  $m_e^*$  คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ
- $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)  $= 6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.21) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 n_i &= \int_0^{E_i} n(E) dE \\
 &= \int_0^{E_i} N_c(E) f(E) dE
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

เมื่อ  $E_i$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกหลายๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานช้อน (non-degeneracy) และ  $n(E) d(E)$  มีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.22) จึงสามารถขยายขอบเขต  $E_i$  ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^\infty \frac{E^{2/3}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE
 \tag{2.23}$$

เนื่องจาก  $\exp[(E - E_F)/kT] + 1 \gg 1$  นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp\left[ \frac{E_F}{kT} \right]
 \tag{2.24}$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2}
 \tag{2.25}$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[ -\frac{E_F + E_g}{kT} \right]
 \tag{2.26}$$

โดย

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2}
 \tag{2.27}$$

เมื่อ

$E_g$  คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

$m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

$N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.26) และสมการที่ (2.27) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.28)$$

และ

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.29)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_c^* m_h^*}{m^2}\right)^{3/4} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

### 2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีบริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสถานะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.31)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.32)$$

ภายใต้สถานะที่สถานะพลังงานช้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

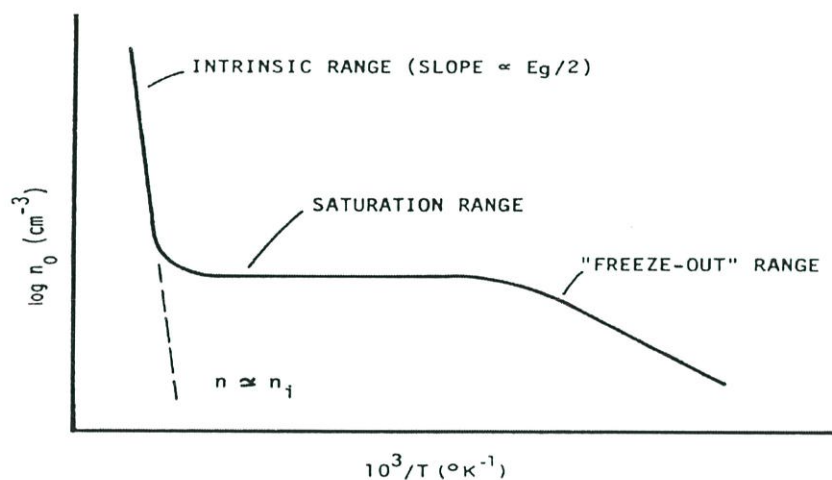
$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.33)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level:  $E_d$ ) และอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level:  $E_a$ ) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ  
 $N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ  
 $n_i, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.23 คือ



รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด  
 เอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของอะตอมของสารเจือปนจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อนพาหะอิสระเกิดจากสองส่วน คือมาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.34) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.36)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.37)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่า

เป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.36) และ (2.37) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.38)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.27) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.39)$$

## 2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.39) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.40)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{\frac{E_d + E_F}{kT}\right\}} \right] \quad (2.41)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.31), (2.40) และ (2.41) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.33) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.43)$$

$n$  อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $E_d \gg kT$  และ  $N'_c$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.44) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$\begin{aligned} n &= -\left(\frac{N_a + N'_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} + \dots \\ n &\cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \end{aligned} \quad (2.45)$$

ถ้า  $N_a \gg N'_c$  สมการที่ (2.45) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N'_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.46)$$

ถ้า  $N_a$  มีค่าน้อยมากนั่นคือ  $N_d \gg N'_c \gg N_a$  จะทำให้สมการที่ (2.46) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.47)$$

หรือ

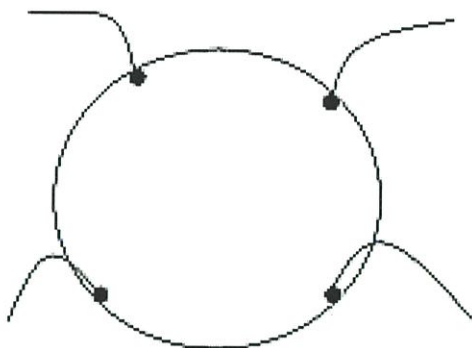
$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.48)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.47) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.48) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

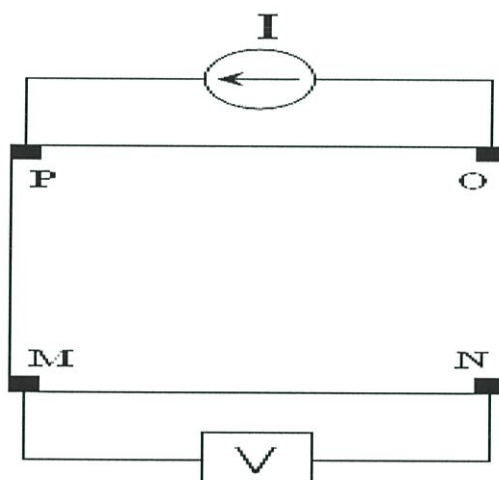
### 2.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(จูตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และ 2.25 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.24 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่น และสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.25 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.49)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.49)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.50)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.50)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.51)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.52)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.53)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

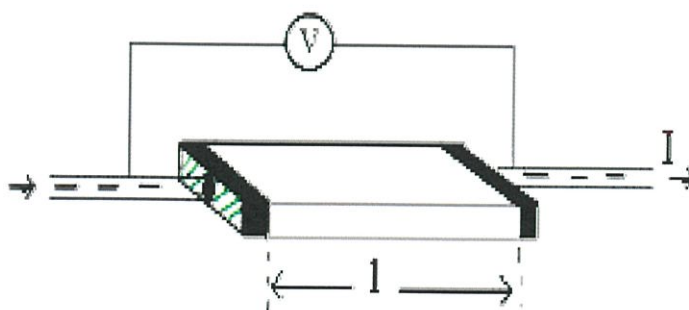
### 2.3.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method) (ฐิตินัย,

2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958;

ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง ดังรูปที่ 2.26 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.26 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.54)$$

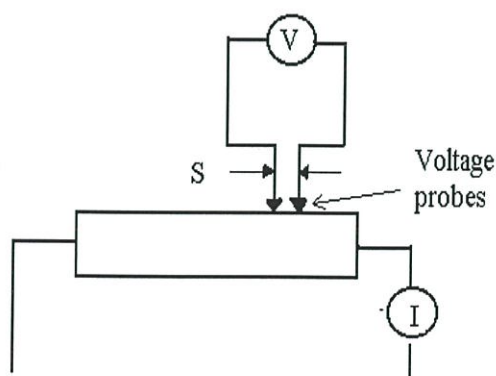
$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.55)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัส โอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

#### 2.3.4 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว (two point probes) (จิตินัย, 2550;

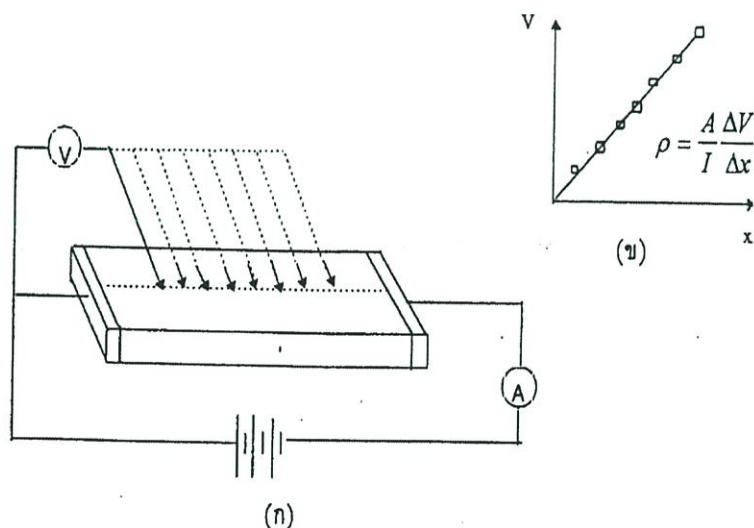
Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; คูสัต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.27 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.27 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำกรวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีเรียงขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.28 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.28 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

- ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
- ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975; Elangovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.56)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.57)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ  
 $\mu_e$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.59) และ (2.60) คือ

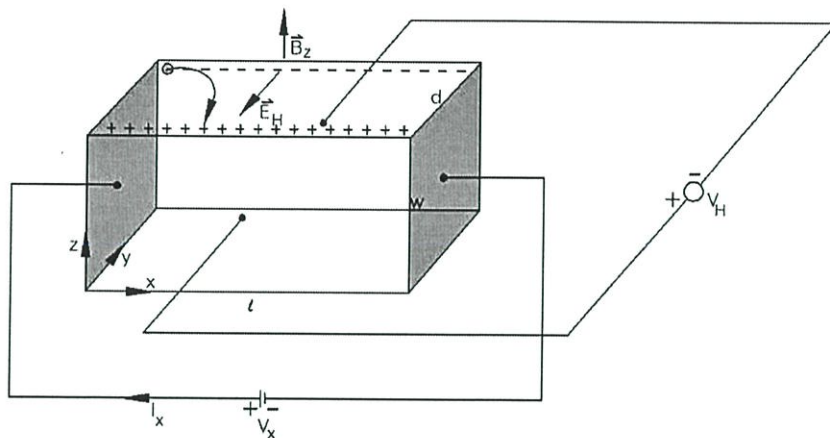
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\text{ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.59)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\text{ความหนาแน่นของโฮล} \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.60)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.29 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.62)

จาก 
$$I = nqvA \quad (2.61)$$

ดังนั้น 
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.62)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.63)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.64)$$

จากรูปที่ 2.22

$$A = w.d \quad (2.65)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.53) และ (2.64) และ (2.65)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.66)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมออันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สอดคล้องกับกฎของฮอลล์ (Hall's Law) ในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิด

สนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall voltage:  $V_H$ ) ขึ้นทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(V_x \times B_z) + qE_y \quad (2.67)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $x$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.68)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.66) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.69)$$

เมื่อ  $J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.70)$

แล้ว  $R_H = \frac{E_x}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.71)$

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \end{aligned} \quad (2.72)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.73)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.74)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลาย ๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.75)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.76)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.77)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.78)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.79)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.80)$$

หรือ จากสมการที่ (2.74) และ (2.80) 
$$\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.81)$$

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

### 2.3.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550;

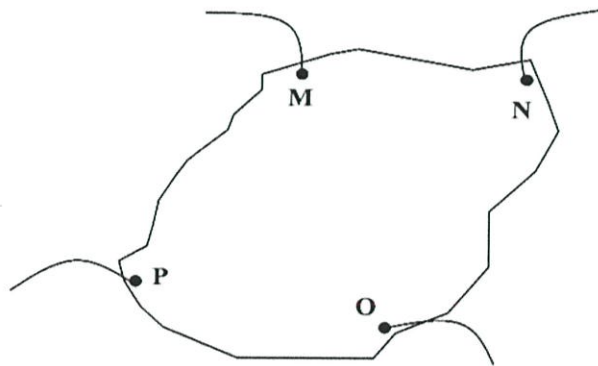
วีรัชย์, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สุกฤษฎ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998

Elangovan , 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; Tilley, 2004)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สาระสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใด ๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปร่างเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.30 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปร่างใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าไปในแนวทแยงมุมชี้  $M, O$  และวัดความต่างศักย์จากขั้ว  $N, P$

นิยาม 
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.82)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

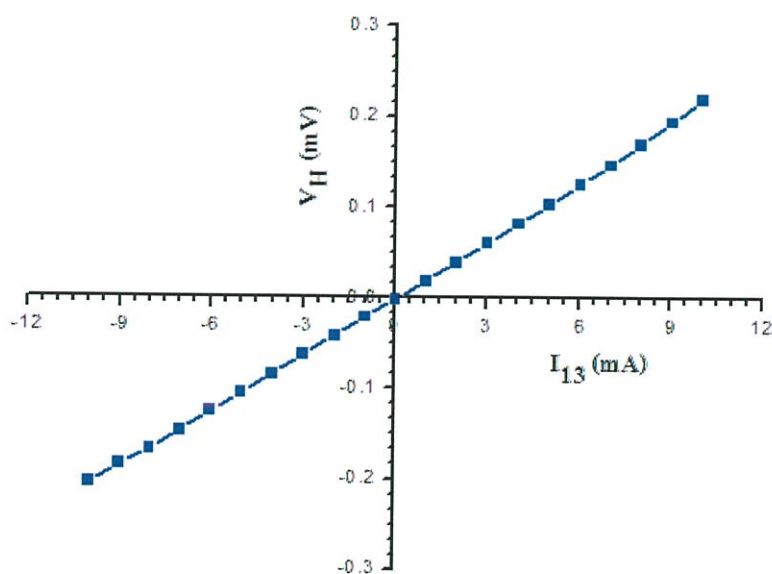
$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.83)$$

เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก  
 $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง  
 $B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.83) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.84)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.28 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.85)$$

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ต่อจากนั้นเราจะศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้แก่ ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง เพื่อหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้อง หัวข้อสุดท้ายจะเป็นการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส และจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญโดยการจำลองแบบด้วยวงจรสมมูลที่เหมาะสมต่อไป

#### 3.1 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2547)

##### 3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจาน
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำปอดคประจุที่ล้างด้วยระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน โดยระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล โดยระบบอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำปอดคประจุที่ล้างด้วยระบบอัลตราโซนิกอีกครั้ง เป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
6. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปเป่าแห้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด

7. บรรจุแผ่นกระจกสไลด์ในถุงเพื่อนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศต่อไป

### 3.1.2 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ให้มีน้ำหนัก 0.3 กรัม เพื่อใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. นำผงผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด
3. เมื่อเตาเย็นลงจึงนำผงผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ออกมาจากเตา
4. นำผงผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ที่ได้ไปชั่งให้มีปริมาณ 0.3 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุใส่ลงไปในภาชนะระเหยสาร (boat) ชนิดโมลิบดีนัมเคลือบด้วยอะลูมินา เพื่อนำไปทำเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

### 3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. นำสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด จากนั้นนำสารตั้งต้นบรรจุใส่ลงไปในภาชนะระเหยสาร (boat) ที่เป็นชนิดโมลิบดีนัมเคลือบด้วยอะลูมินา

4. นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอะลูมิเนียมจะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ว่าวาล์วสูบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารี จากนั้นสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์จนได้ความดันตามต้องการ สำหรับการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100-130 แอมแปร์ จะได้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่มีความหนาประมาณ 500-800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบประมาณ 30-40 นาที
8. เมื่อได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยสาร และทำการปิดแบริเอค โดยค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสูบอากาศและปั๊มกลโรตารี ตามลำดับ
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที

3.2 วิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมด โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2547)

3.2.1 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รังสีเอกซ์ย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอมซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

### 3.2.2 การศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

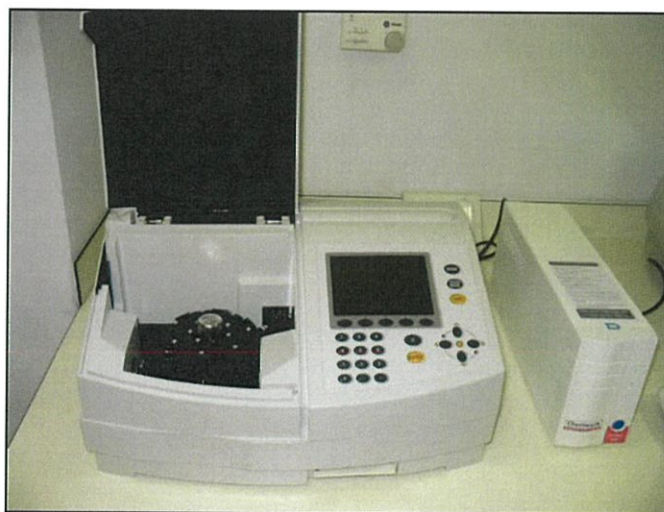
นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5410LV โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM – 5410LV

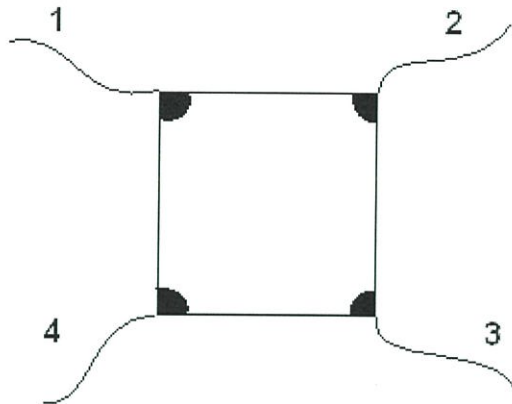
### 3.2.3 การวัดการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation (He  $\lambda$ ions $\alpha$ ) ช่วง 200 – 1,000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation

### 3.2.4 วิธีกรวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2550; ประธาน, 2550)



รูปที่ 3.4 การจัดทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

#### 3.2.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Fluke รุ่น 8808A

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาตัดให้ได้ขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาทำรอยต่อโอห์มมิกโดยใช้กาวเงินแต้มลงผิวหน้าของฟิล์มบางจำนวน 4 จุด ตรงมุมทั้ง 4 ของฟิล์มบาง เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า รอให้กาวแห้งแล้วตรวจสอบการต่อขั้วไฟฟ้าว่าติดเข้ากับสารตัวอย่างดีหรือไม่ โดยการวัดความต่างศักย์ด้วยโอห์มมิเตอร์ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง ตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 3.2.4.2 ขั้นตอนการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกขั้ว 2 โดยแหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 ในโหมดของกระแส ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{43}$  จะได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวก เลือกกระแสหลายๆค่าในช่วง  $-1$  ถึง  $1$  ไมโครแอมป์ แต่ถ้าไม่ได้ความต่างศักย์เป็นค่าบวกให้เปลี่ยนกระแสไหลเข้าที่ขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา
2. จ่ายกระแส  $I_{12}$  แล้ววัดความต่างศักย์  $V_{43}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{12}$  แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{12}$  ค่าที่เหมาะสม เป็นจำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
3. จ่ายกระแส  $I_{12}$  ที่เป็นค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{43}$  ที่เป็นค่าลบปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{12}$  อย่างน้อย 10 ค่า
4. ทำการเขียนกราฟระหว่าง  $I_{12}$  กับ  $V_{43}$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $I_{12}$  ส่วนแกน  $x$  เป็น  $V_{43}$  ความชันของกราฟคือค่า  $1/R_1$
5. จ่ายกระแส  $I_{23}$  ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I_{23}$  แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
6. จ่ายกระแส  $I_{23}$  ค่าลบจากแหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V_{14}$  ที่มีค่าเป็นลบปรับเปลี่ยนค่ากระแส  $I_{23}$  จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
7. เขียนกราฟระหว่าง  $I_{23}$  กับ  $V_{14}$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $I_{23}$  ส่วนแกน  $x$  เป็น  $V_{14}$  ความชันของกราฟคือค่า  $1/R_2$
8. นำเอาค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) จากสูตร

$$R_{sh} = f\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right) \quad (3.1)$$

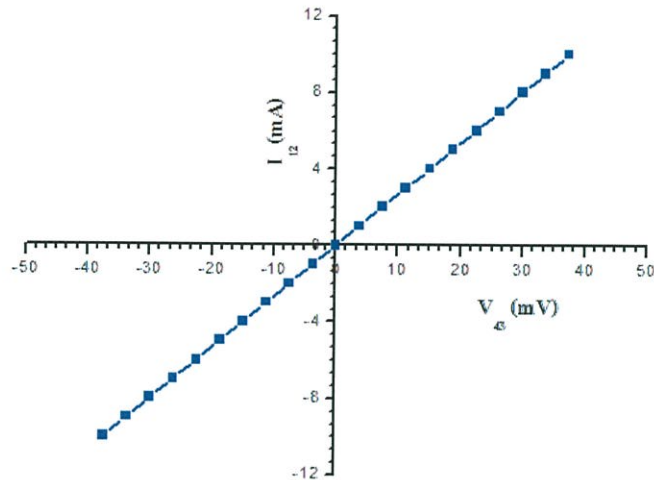
เมื่อ

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (3.2)$$

ส่วนสภาพต้านทานไฟฟ้า คำนวณได้จากสูตร

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (3.3)$$

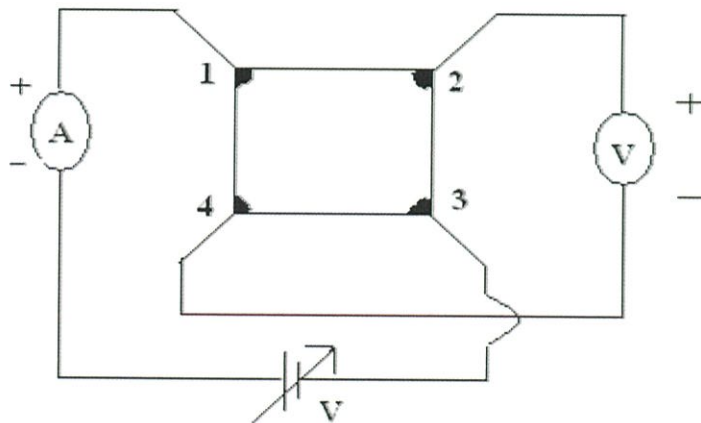
เมื่อ  $d$  คือความหนาของสารตัวอย่าง(หน่วยเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ )

### 3.2.5 วิธีการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550)

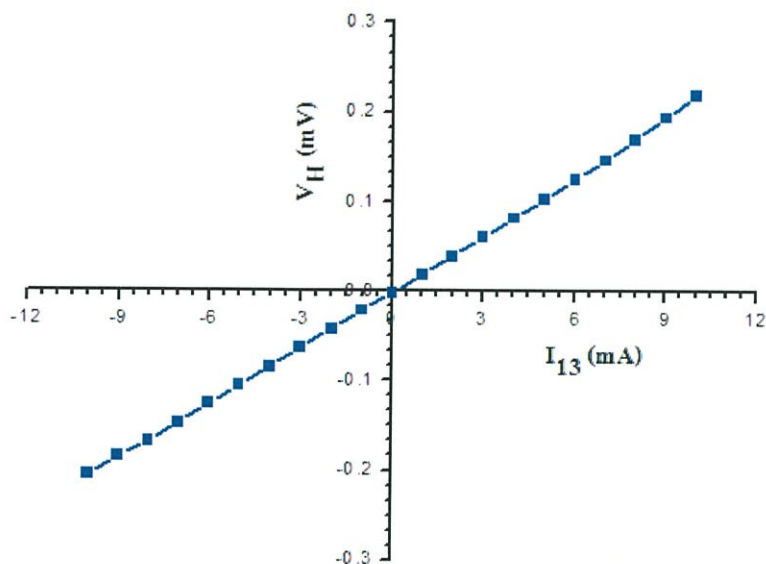
จากปรากฏการณ์ของฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 ทำการ  
จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัด ดังรูปข้างล่างนี้แล้วจึงเริ่มทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.8 วิธีการต่อวงจรเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์

### 3.2.5.1 ขั้นตอนการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

1. ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ ) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี (p-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 3 และไหลออกทางขั้ว 1 ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{24}$  ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าไม่ได้เครื่องหมายเป็นบวก ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน เช่น เปลี่ยนขั้วไปในทิศตามเข็มนาฬิกา
2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก  $B$  ความต่างศักย์  $V_{24}$  ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้จะเรียกว่า  $V'_{24}$  เนื่องจากมีผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์  $V_H$  เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย แต่ถ้า  $V'_{24}$  มีค่าลดลงแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น(n-type) ดังนั้นต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 แล้ว  $V'_{24}$  ยังมีเครื่องหมายเป็นบวกเหมือนเดิม
3. จ่ายกระแส  $I$  ค่าต่างๆ แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V'_{24}$  ที่สอดคล้องกับกระแส  $I$  แต่ละค่าปรับเปลี่ยนกระแส  $I$  ค่าที่เหมาะสม (เช่นในช่วง 0.01- 0.10 ไมโครแอมแปร์) จำนวนอย่างน้อย 10 ค่า
4. จ่ายกระแส  $I$  ค่าลบโดยกำหนดที่แหล่งจ่ายไฟ Keithley รุ่น 236 แล้วทำการวัดความต่างศักย์  $V'_{24}$  ที่เป็นค่าลบปรับเปลี่ยนกระแส  $I$  อย่างน้อย 10 ค่า
5. ความต่างศักย์  $V'_{24} = V_H + V_{24}$  ดังนั้นความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H = V'_{24} - V_{24}$
6. เขียนกราฟระหว่าง  $I$  กับ  $V_H$  โดยให้แกน  $y$  เป็น  $V_H$  และแกน  $x$  เป็น  $I$  ความชันของกราฟคือ  $R_H \left( \frac{B}{d} \right)$  เมื่อ  $B$  คือสนามแม่เหล็กและมีค่าเท่ากับ 4,600 เกาส์  $d$  คือ ความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

7. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์  $R_H$  จากสูตร

$$R_H = 10^8 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\frac{V_H}{I}$  คือ ความชันที่ได้จากกราฟ  $I$  กับ  $V_H$ ,  $R_H$  มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์,  $I$  มีหน่วยเป็นแอมแปร์,  $V_H$  มีหน่วยเป็นโวลต์,  $d$  มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและ  $B$  มีหน่วยเป็นเกาส์

8. ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{qR_H} \quad (3.5)$$

สภาพคล่องของฮอลล์ ( $\mu_H$ ) คือ

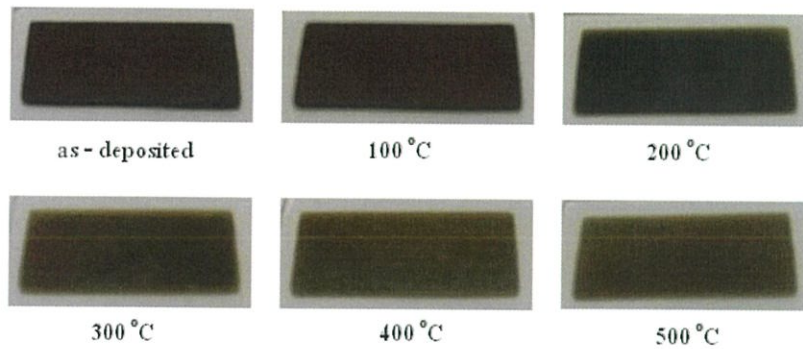
$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (3.6)$$

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้จะเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อีกทั้งศึกษาสมบัติเชิงแสงและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง กรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศนั้นจะนำไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยใช้แบบจำลองของวงจรที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับความต้านทานขนาน (shunt resistance) โดยมีความต้านทานภายนอกอีกตัวหนึ่งมาทำหน้าที่เป็นความต้านทานอนุกรม (series resistance)

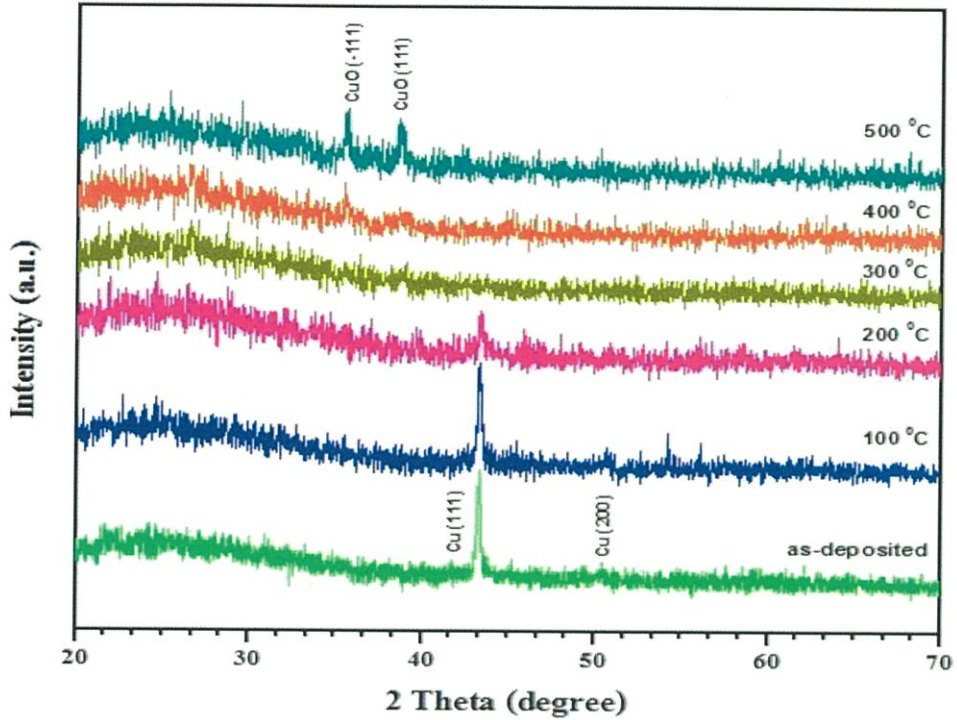
- 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ มีสีดำ มันวาวสะท้อนแสง ยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดี และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มบางมีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาราว 500 นาโนเมตร จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

#### 4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuO}$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

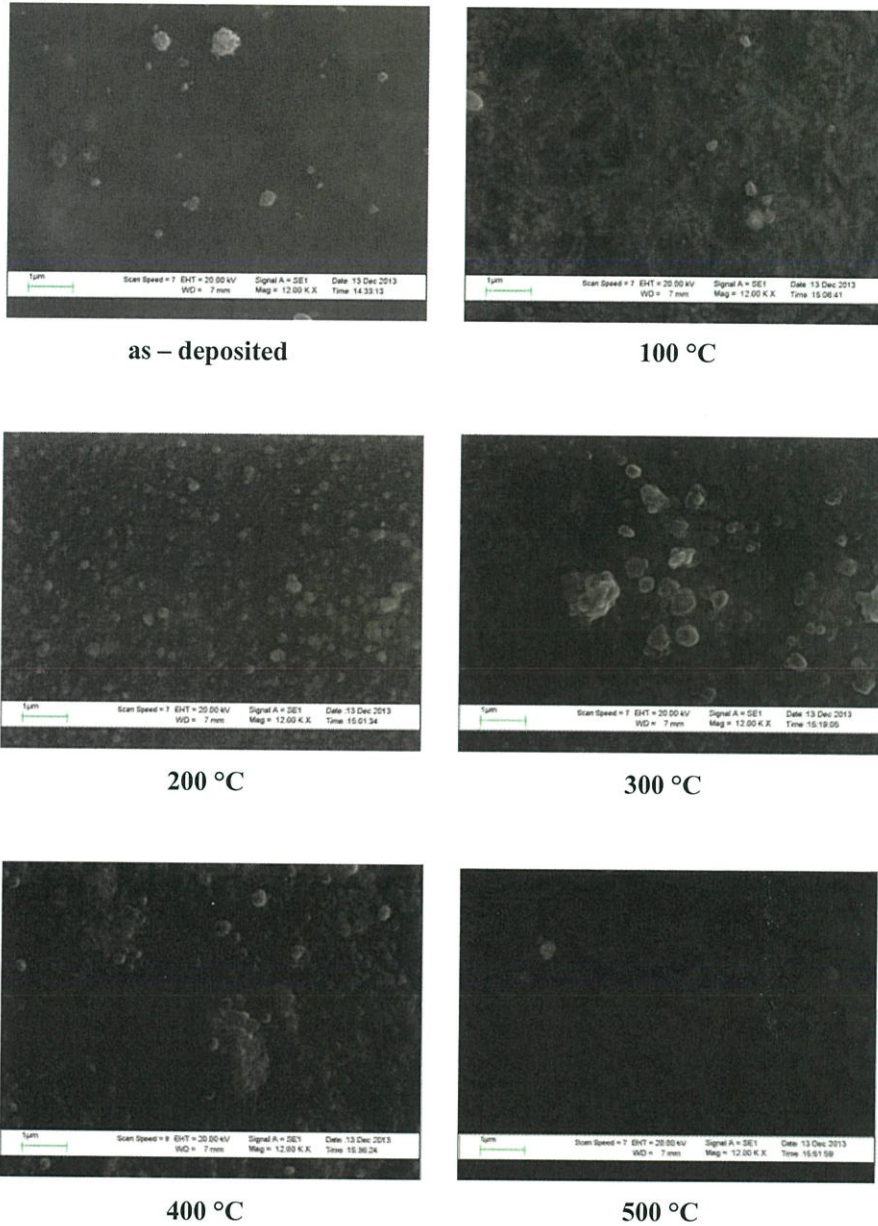
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  ที่ไม่มีการแอนนีสและเมื่อแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส เนื่องจากไม่พบพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟส  $\text{CuO}$  แต่จะปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟส  $\text{Cu}$  ที่มุม  $2\theta = 43.298$  องศา และมุม  $2\theta = 50.434$  องศา ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระนาบ (111) และ (200) ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส เนื่องจากไม่ปรากฏพีคของระนาบโครงสร้างใดๆ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่าพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่สอดคล้องกับเฟส  $\text{CuO}$  ปรากฏเด่นชัดที่มุม  $2\theta = 35.495$  องศา และมุม  $2\theta = 38.686$  องศา ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับ ระนาบ (-111) และ (111) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลีนิก แสดงว่าการแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะพบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuO}$  เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

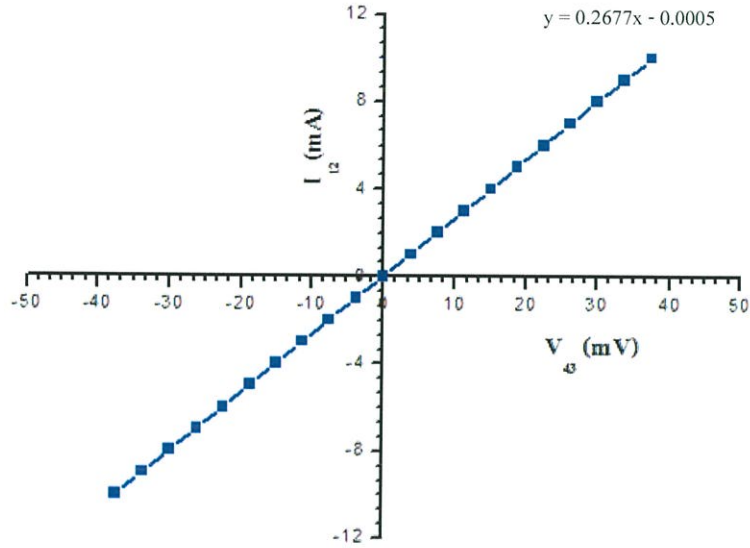
**4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ**

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังปรากฏในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ามีกลุ่มก้อนของผลึก (cluster) กระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กลุ่มก้อนเหล่านี้มีขนาด 600 – 800 นาโนเมตร กระจายอยู่ห่างๆกัน ส่วนพื้นหลัง (background) เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยเช่นกันแต่มีเกรนขนาดเล็กกว่ามาก และเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นกลุ่มก้อนผลึกเหล่านี้จะมีขนาดเล็กลง และแพร่เข้าใกล้กันมากขึ้น ส่วนเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลุ่มก้อนเหล่านี้ยังคงคลุมไม่เต็มผิวหน้าของฟิล์มบาง

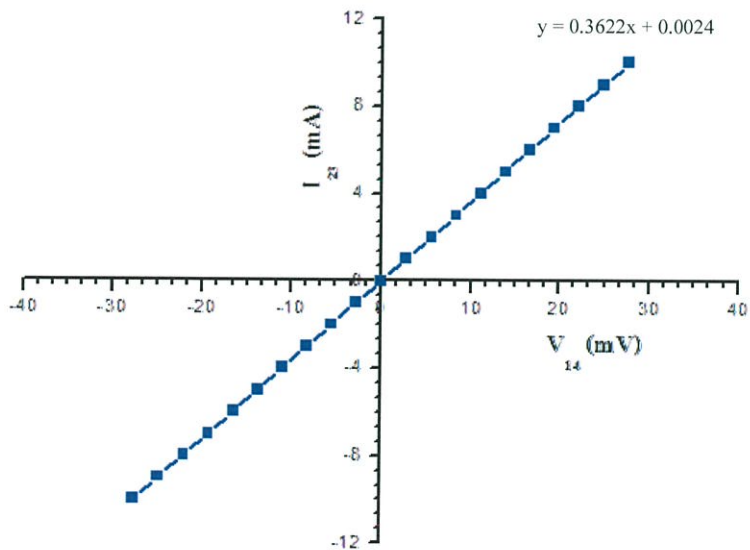


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

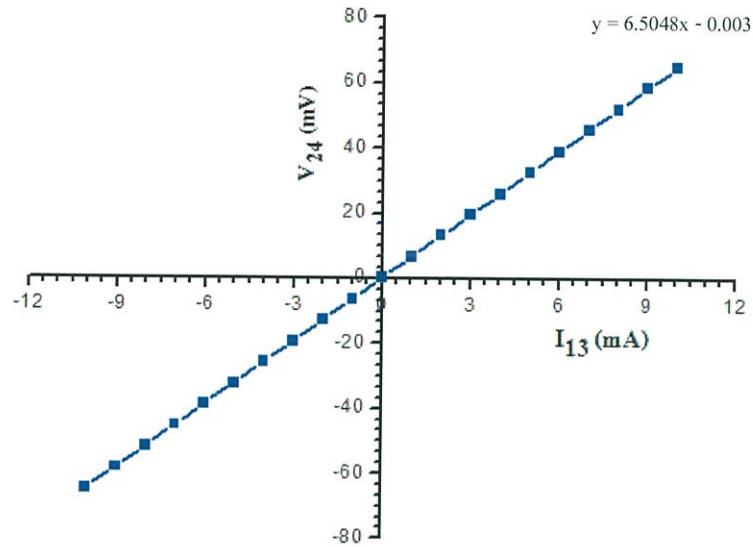
- 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



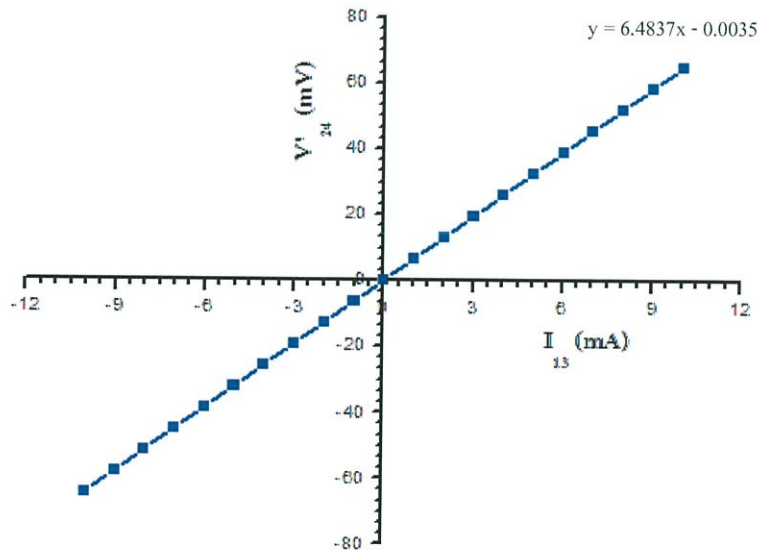
รูปที่ 4.4 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



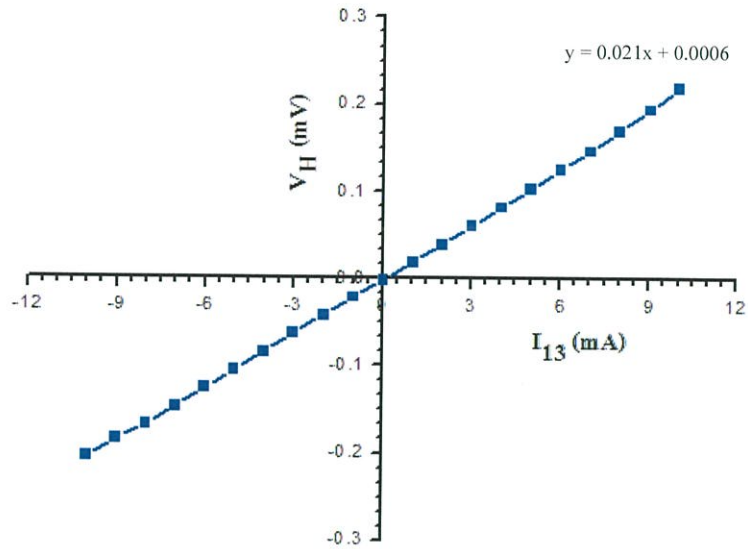
รูปที่ 4.5 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



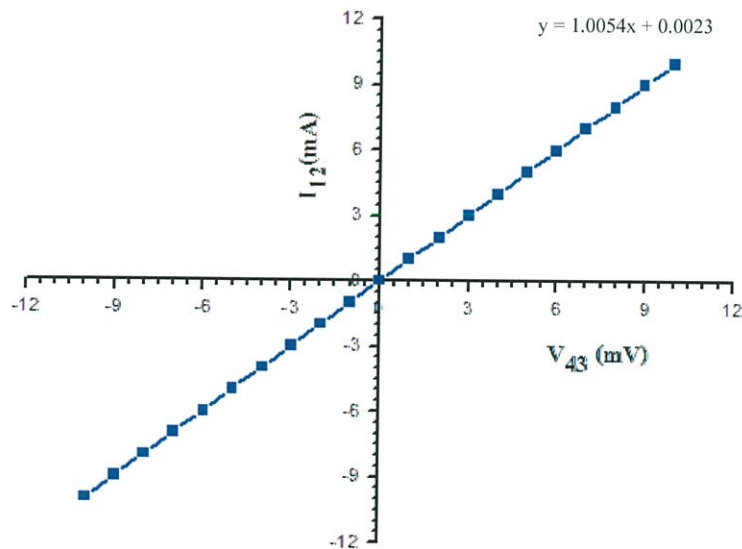
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



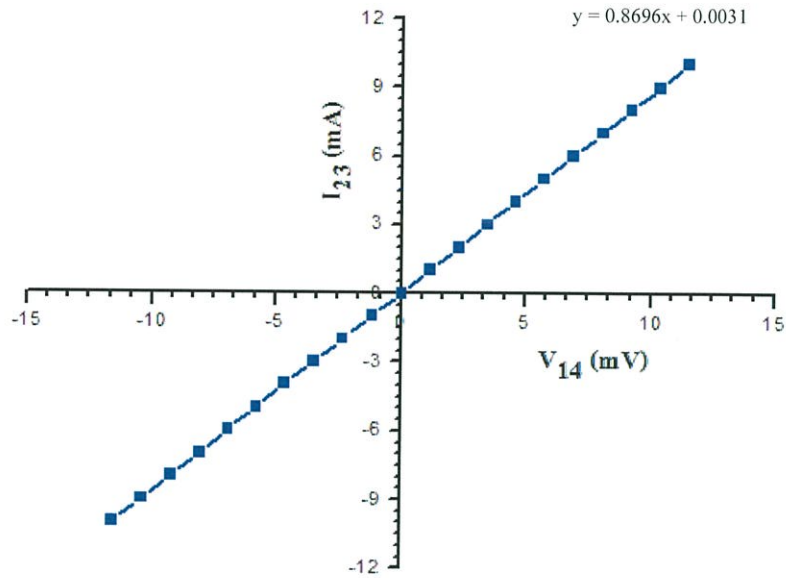
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนาม แม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



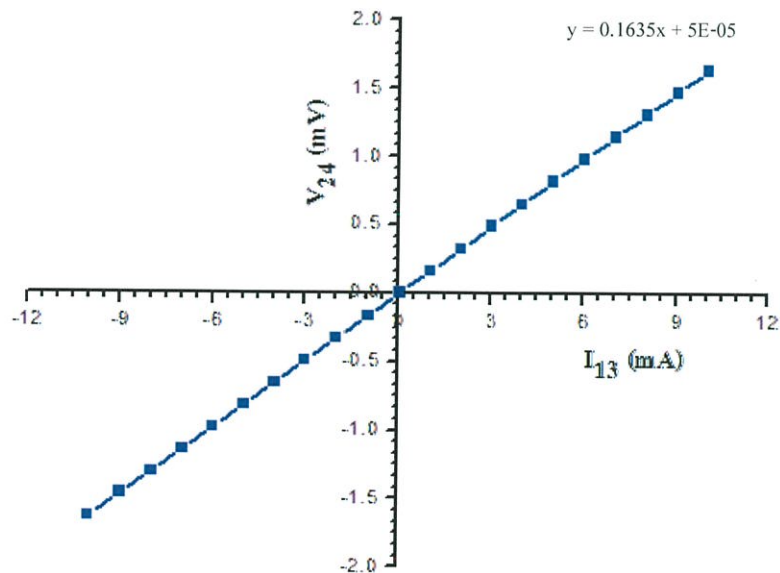
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



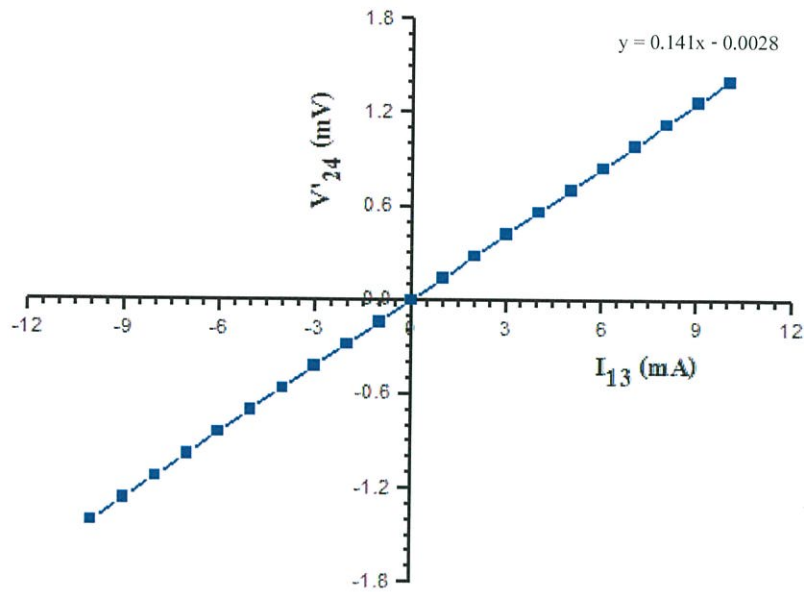
รูปที่ 4.9 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



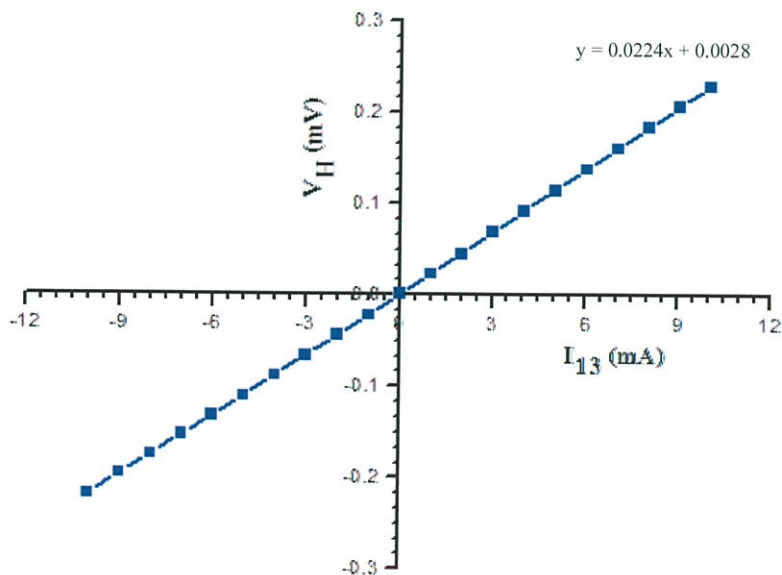
รูปที่ 4.10 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



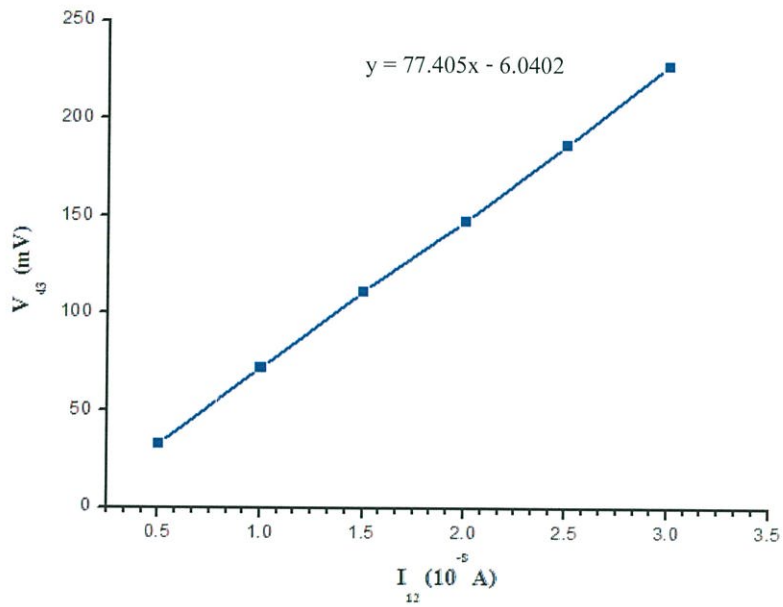
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



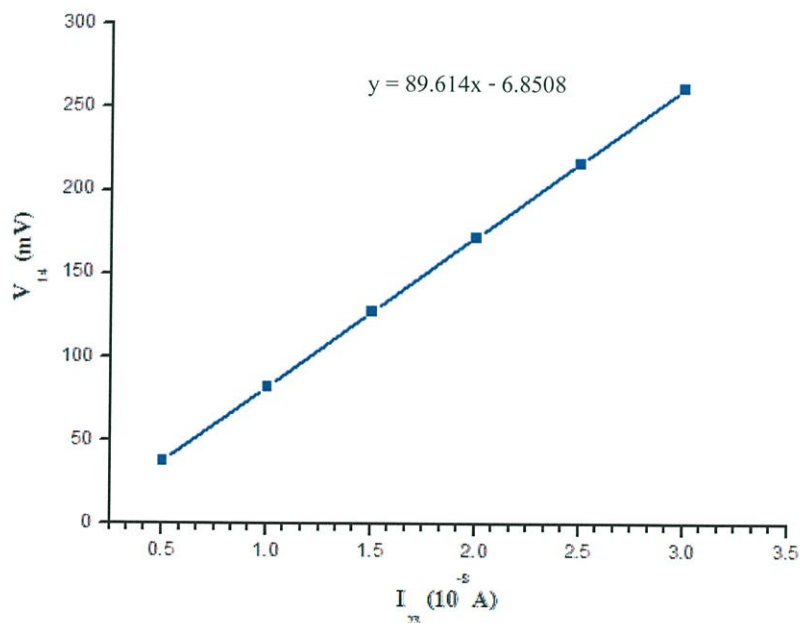
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



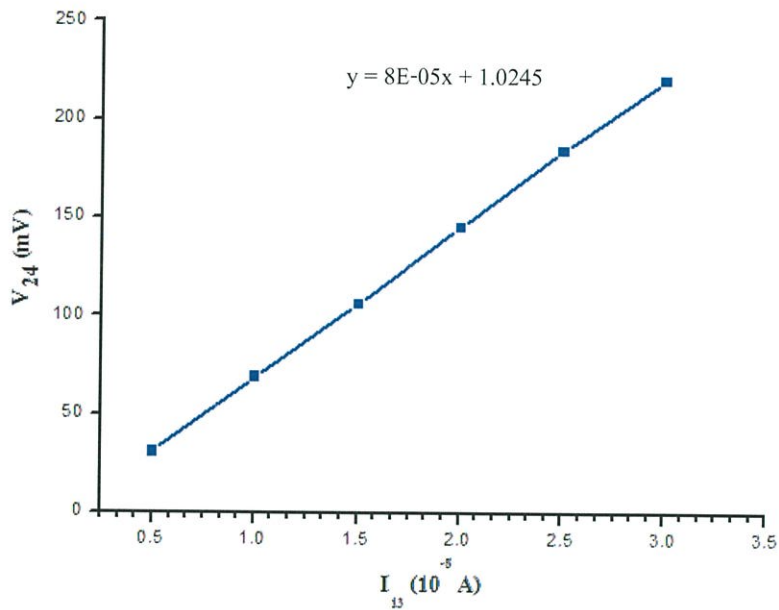
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



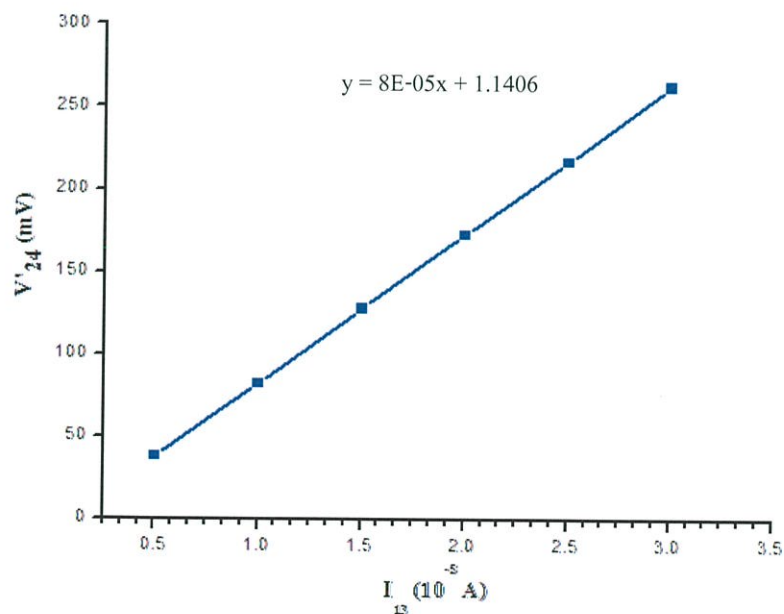
รูปที่ 4.14 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์พัวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



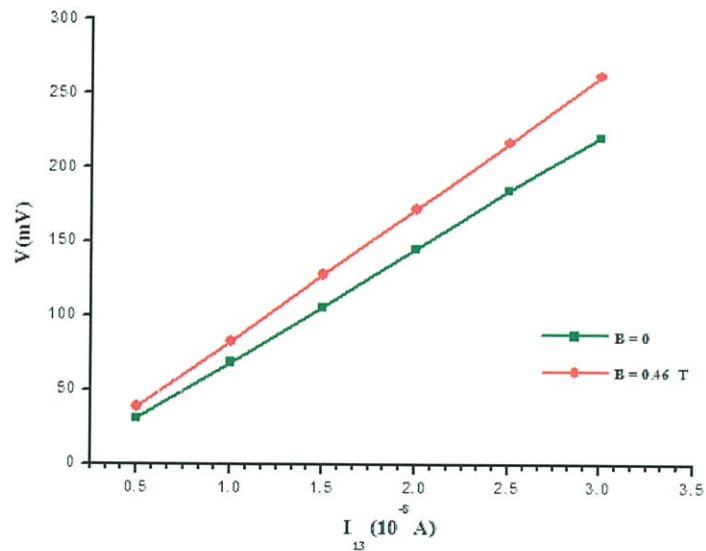
รูปที่ 4.15 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากกราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์พัวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



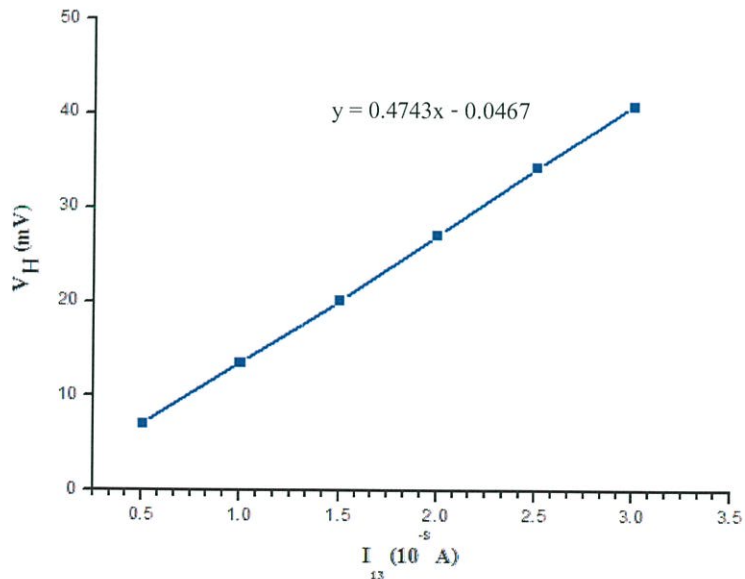
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



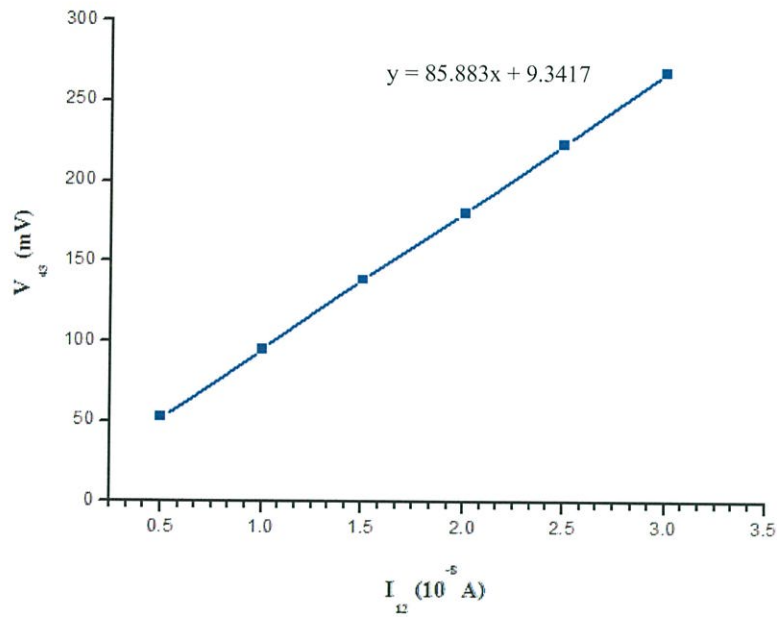
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนาม แม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



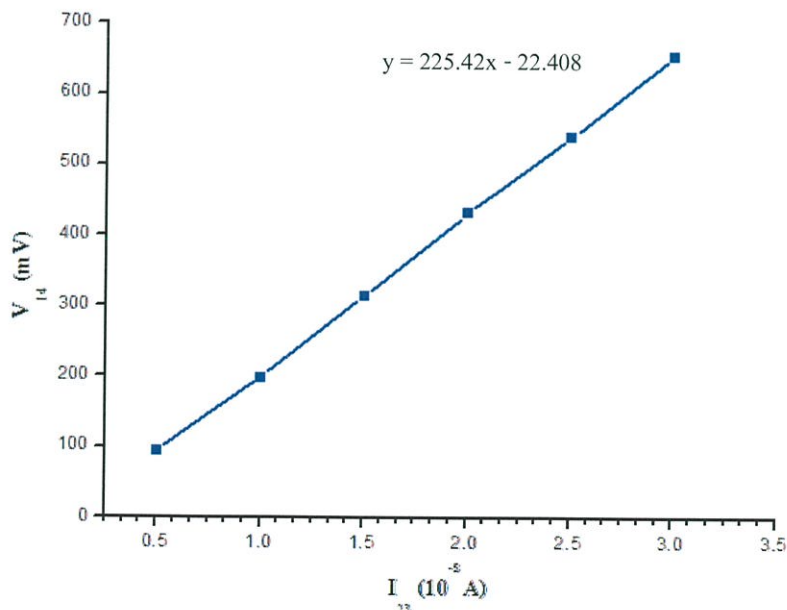
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



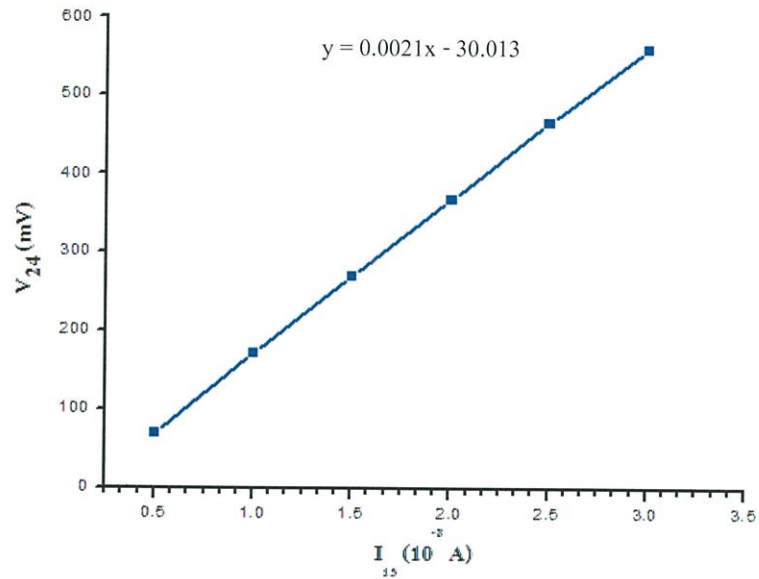
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



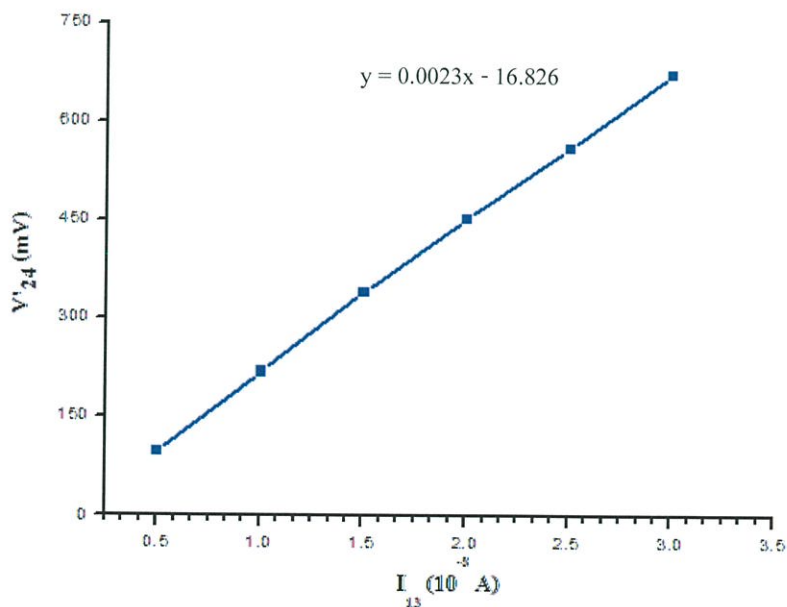
รูปที่ 4.20 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



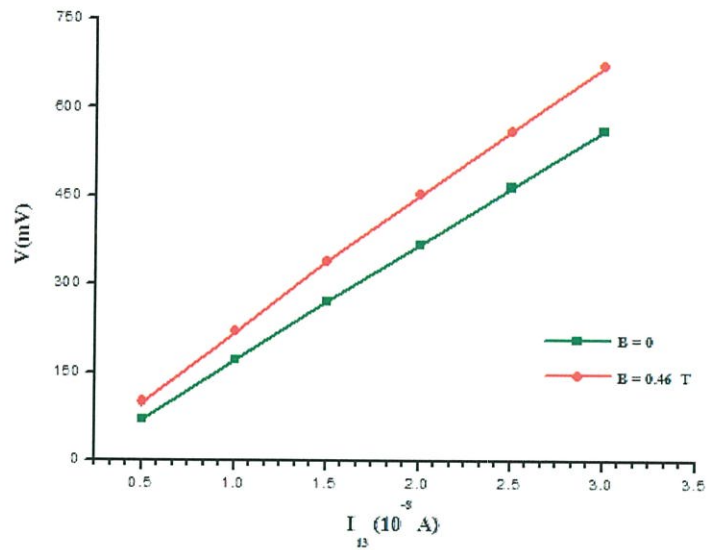
รูปที่ 4.21 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



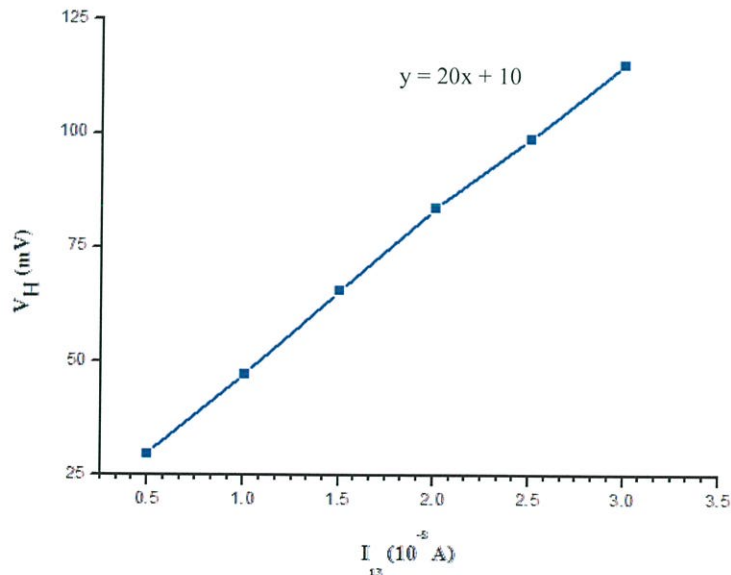
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



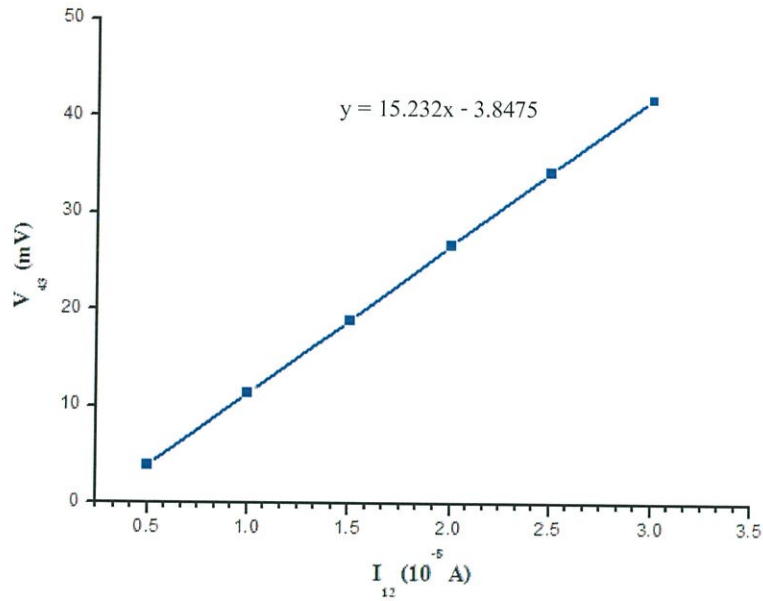
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนาม แม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสูญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



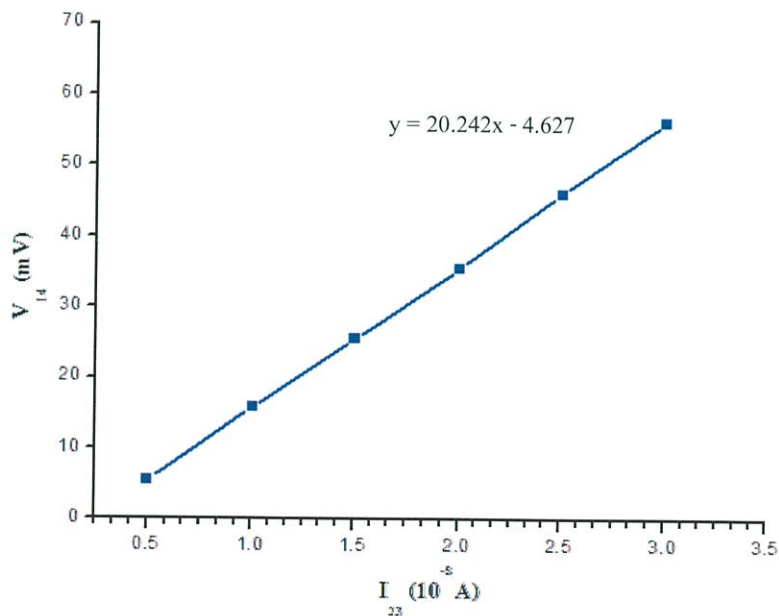
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



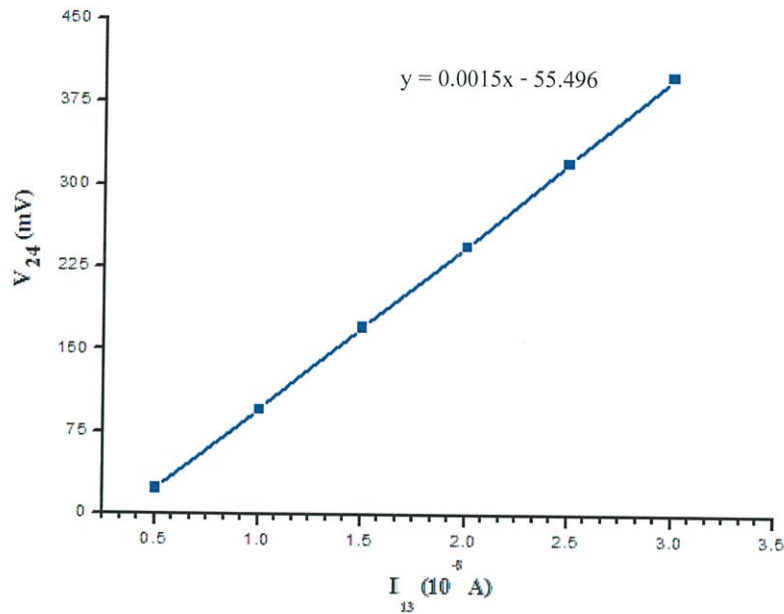
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



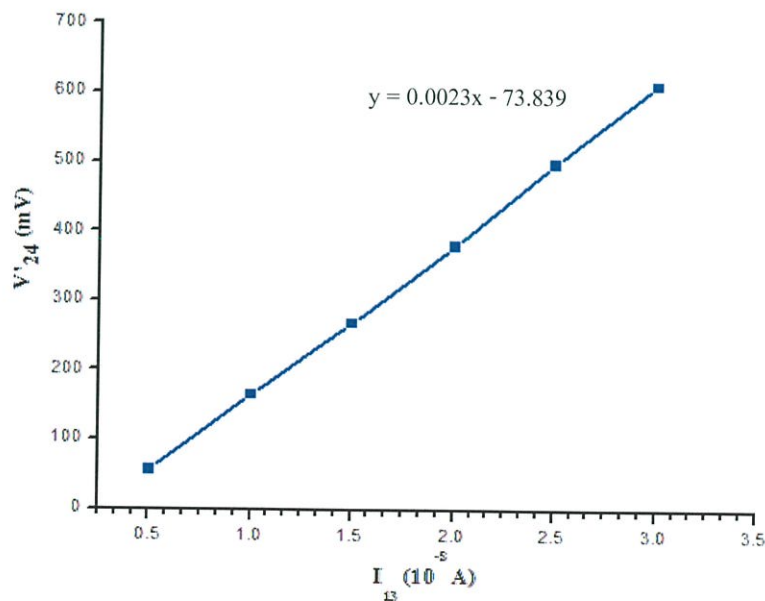
รูปที่ 4.26 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



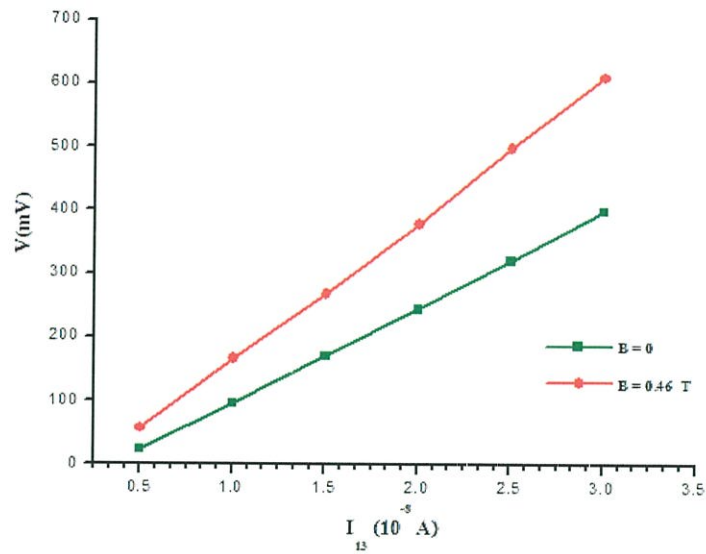
รูปที่ 4.27 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



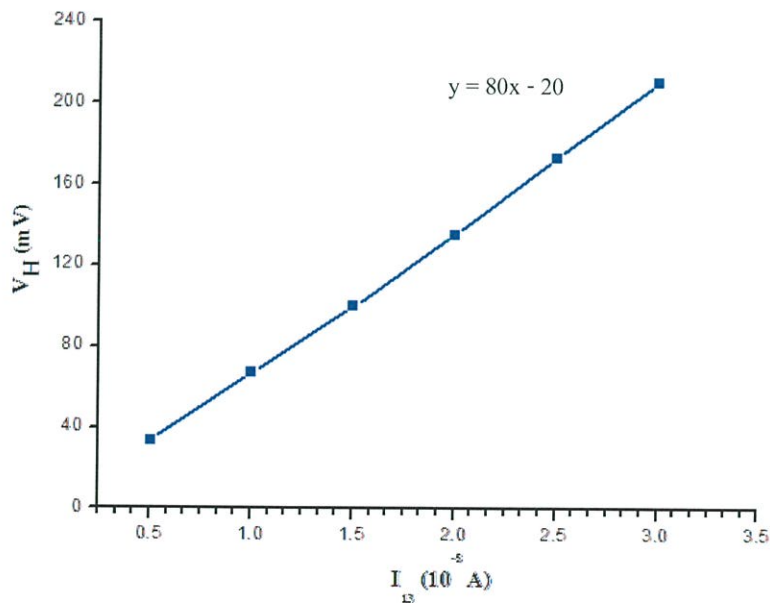
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ได้ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



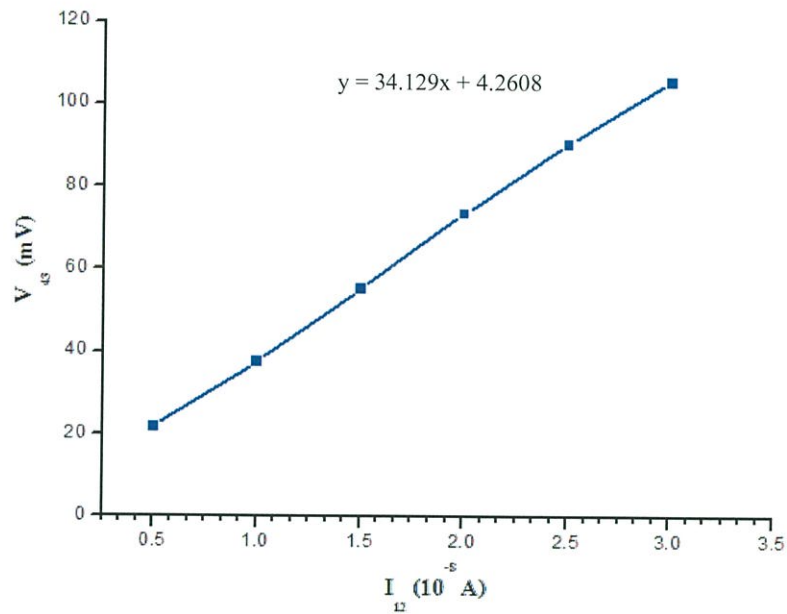
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีได้ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบ สูญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



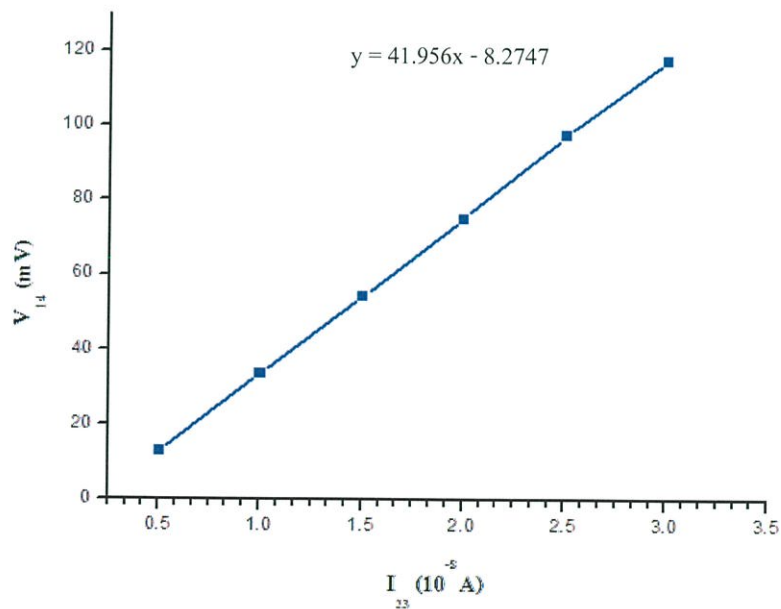
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



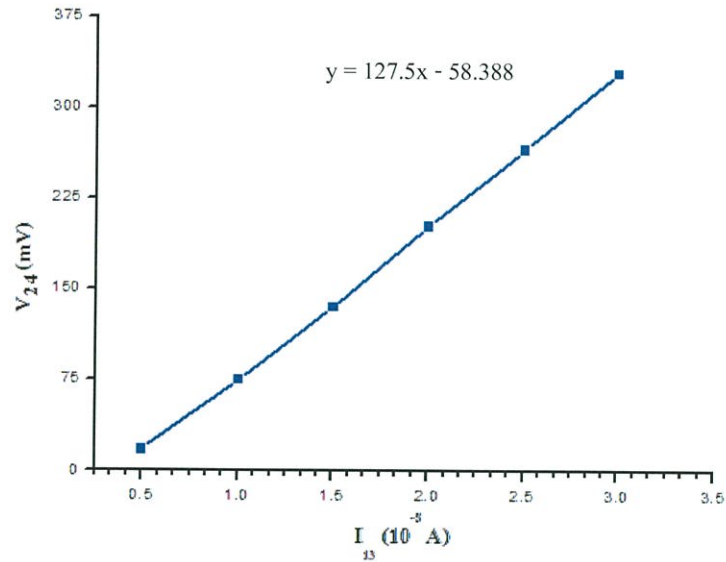
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



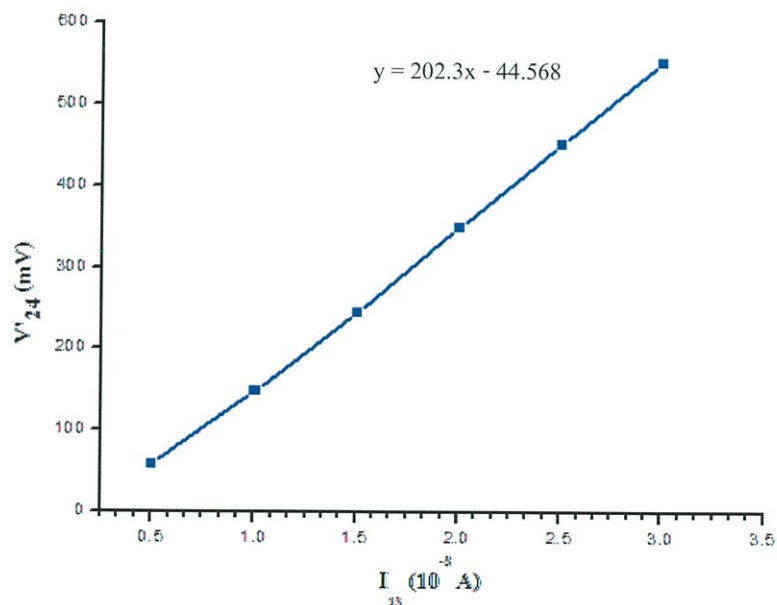
รูปที่ 4.32 การหาค่าความต้านทาน  $R_1$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



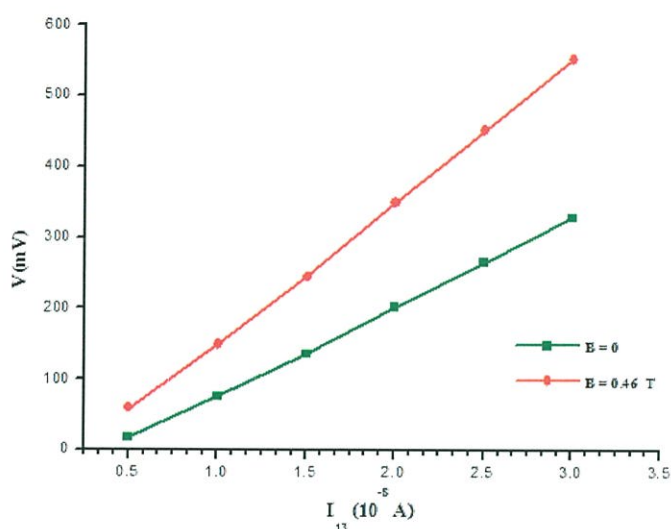
รูปที่ 4.33 การหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



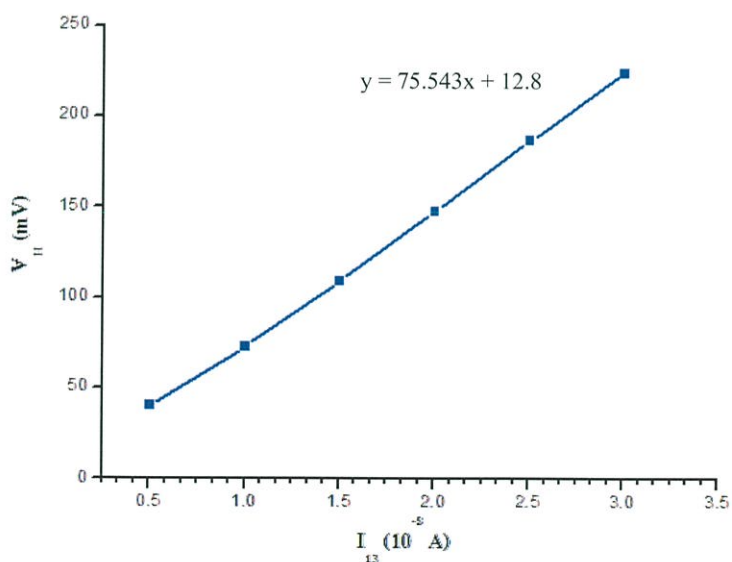
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณียังไม่ใส่ สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $V'_{24}$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) กรณีใส่สนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



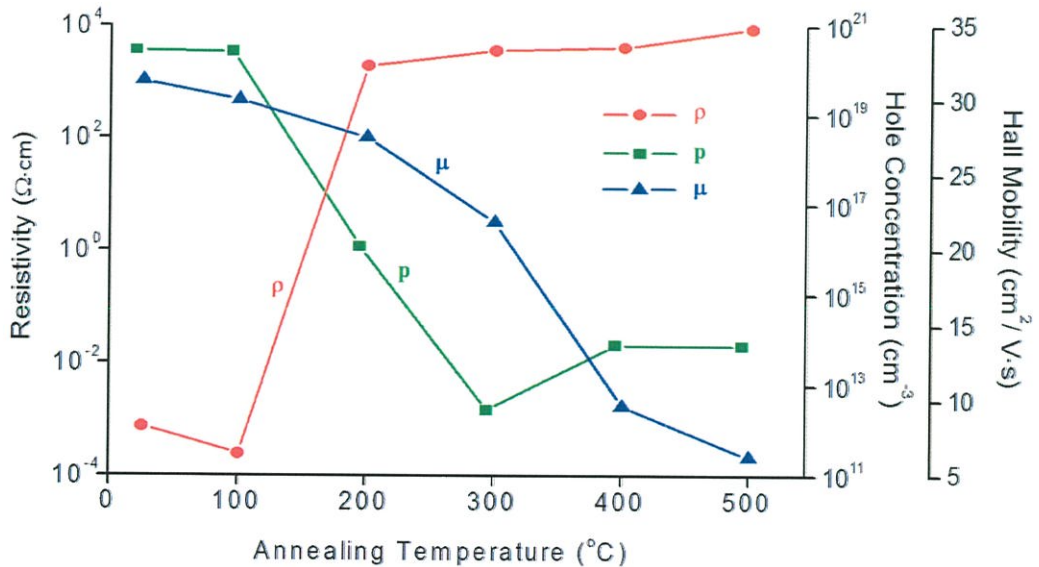
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า กรณียังไม่ใส่สนามแม่เหล็ก ( $V_{24}$ ) กับกรณีใส่สนามแม่เหล็ก ( $V'_{24}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

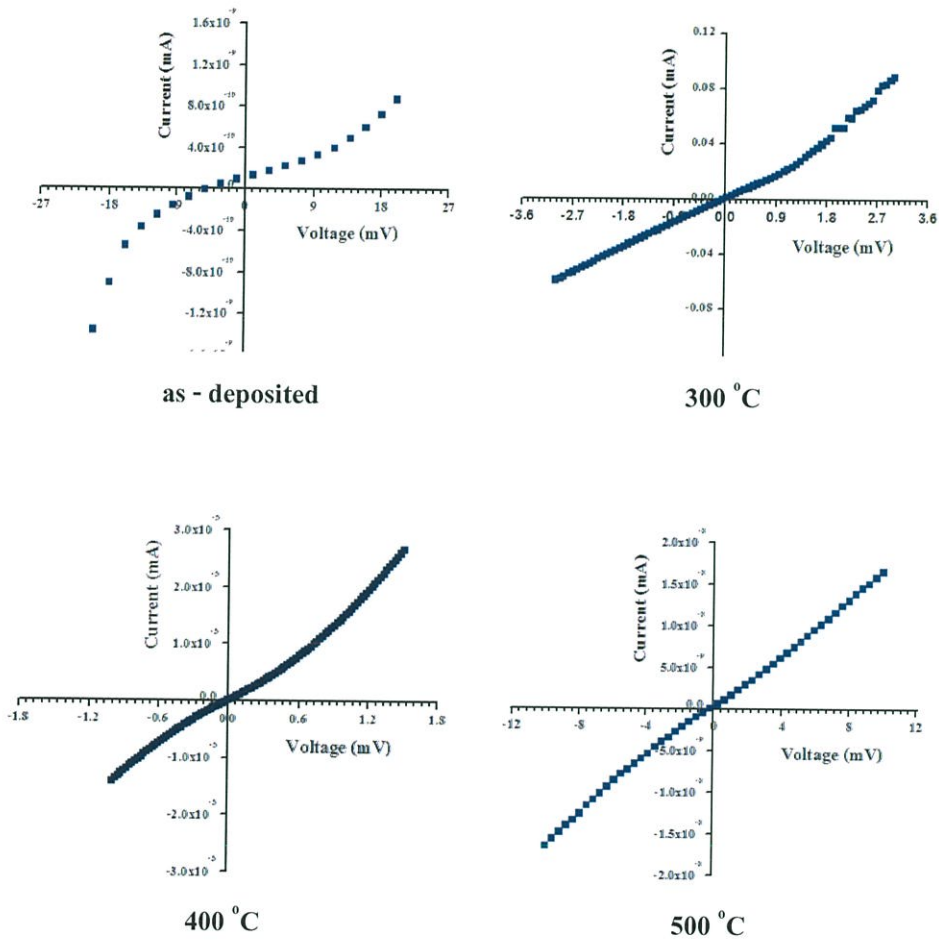
ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Annealing Temperature (°C)	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$R_H$ ( $\text{cm}^2/\text{C}$ )	$p$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\mu_H$ ( $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
as-deposited	3.74	2.76	14.57	$7.29 \times 10^{-4}$	$2.28 \times 10^{-2}$	$2.74 \times 10^{20}$	31.28
100	1.00	1.15	4.81	$2.41 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{-2}$	$2.57 \times 10^{20}$	30.01
200	$7.74 \times 10^6$	$8.96 \times 10^6$	$3.75 \times 10^7$	$1.87 \times 10^3$	$5.16 \times 10^2$	$1.21 \times 10^{16}$	27.52
300	$8.59 \times 10^6$	$2.25 \times 10^6$	$6.98 \times 10^7$	$3.49 \times 10^3$	$2.17 \times 10^4$	$2.88 \times 10^{12}$	21.85
400	$1.52 \times 10^7$	$2.02 \times 10^7$	$7.96 \times 10^7$	$3.98 \times 10^3$	$8.70 \times 10^4$	$7.81 \times 10^{13}$	9.62
500	$3.41 \times 10^7$	$4.20 \times 10^7$	$1.71 \times 10^8$	$8.53 \times 10^3$	$8.21 \times 10^4$	$7.60 \times 10^{13}$	6.22



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- 4.5 ผลการศึกษาความต้านทานจำเพาะ ของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับ ฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (specific contact resistance:  $\rho_c$ )

จากนิยาม

$$\rho_c = \left(\frac{\partial V}{\partial J}\right)_{V=0} \quad (4.1)$$

$$\rho_c = R_c A \quad (4.2)$$

$$R_c = \left(\frac{\partial V}{\partial J}\right)_{V=0} \quad (4.3)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของจุดเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า สามารถหาค่า  $R_c$  ได้จากความชัน

จะได้ว่า

$$R_c = \frac{1}{\text{ความชัน}} \quad (4.4)$$

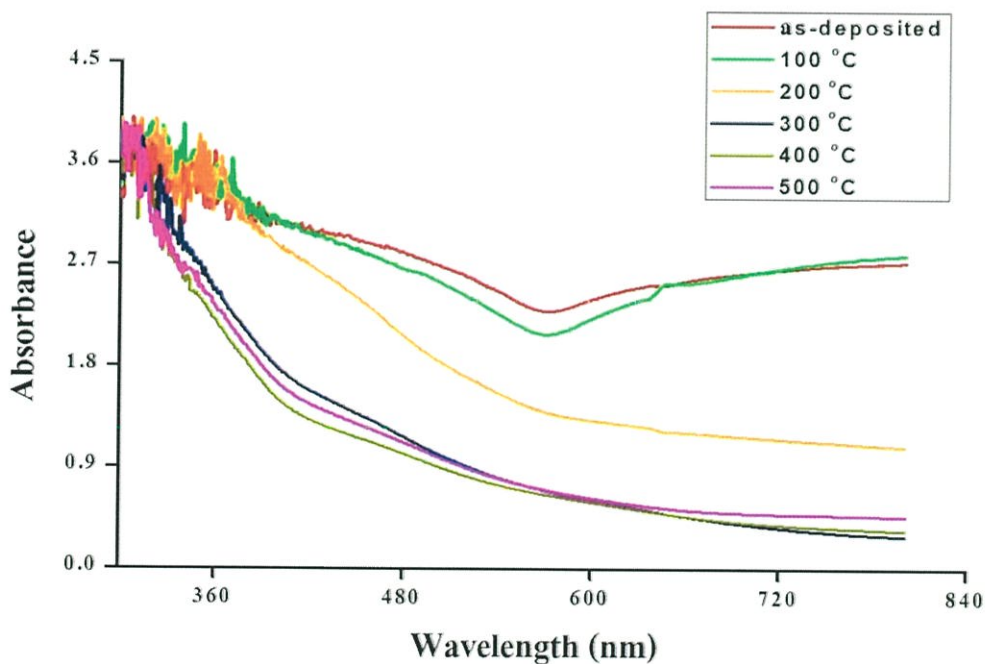
จากการทดลองสรุปได้ว่า รอยต่อระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO จะประพฤติตัวเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ดังปรากฏค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิก ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

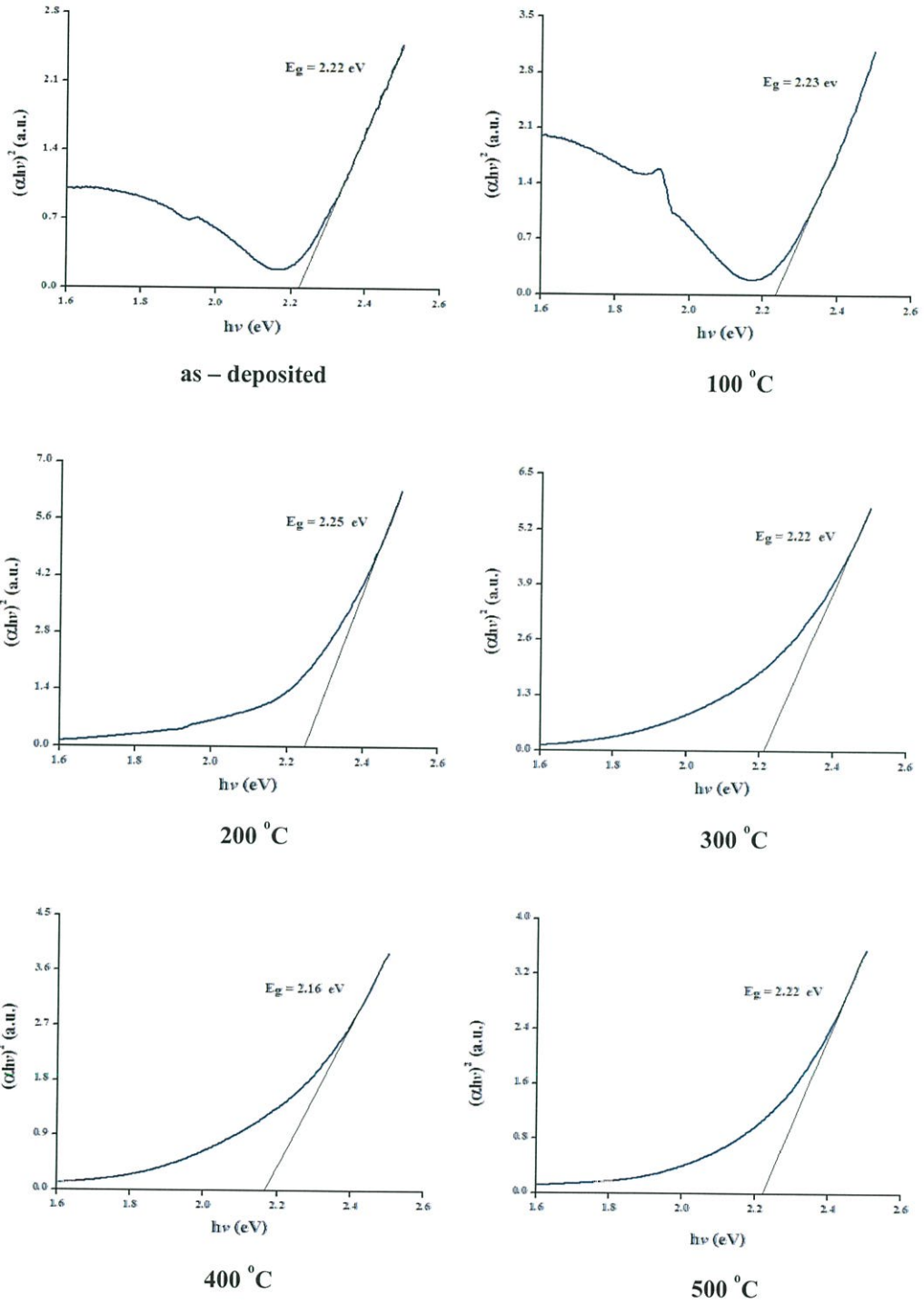
Annealing Conditions		Contact Conditions		
Temperature (°C)	Time (min)	Area (cm <sup>2</sup> )	$R_c$ (Ω)	$\rho_c$ (Ω·cm <sup>2</sup> )
as-deposited	60	0.126	$3.73 \times 10^{10}$	$4.69 \times 10^9$
300	60	0.126	50.00	6.29
400	60	0.126	959.69	120.63
500	60	0.126	$1.22 \times 10^9$	$1.54 \times 10^8$

4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.40 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200–1000 นาโนเมตร พบว่าขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปตามอุณหภูมิแอนนัลที่เพิ่มขึ้น จากนั้นจึงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล ดังปรากฏในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.42



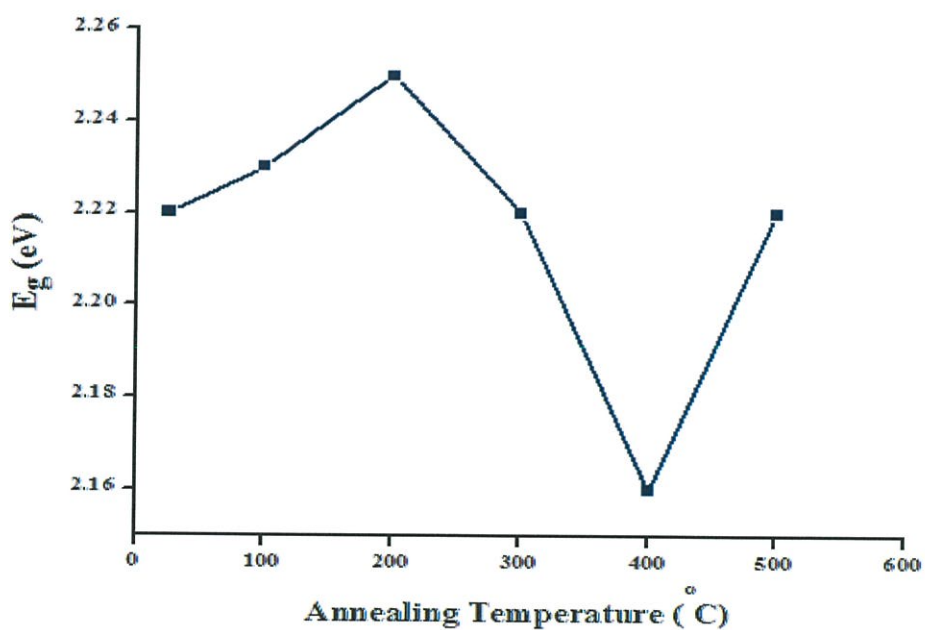
รูปที่ 4.40 กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.41 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

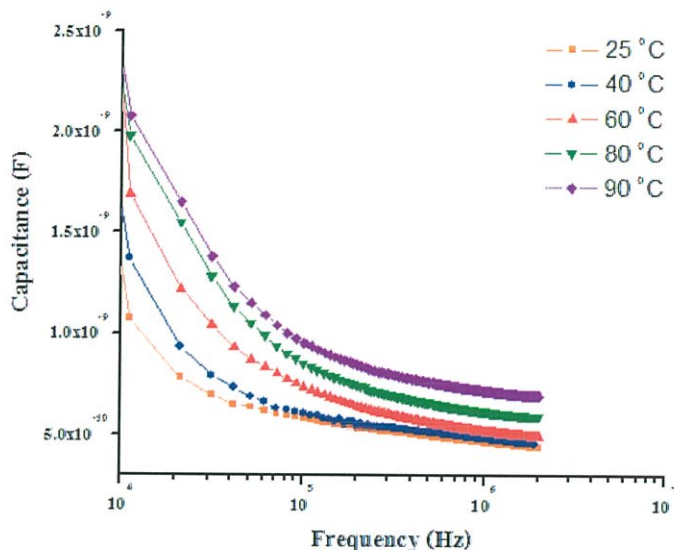
ตารางที่ 4.3 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Annealing Temperature ( $^{\circ}$ C)	Energy Gap (eV)
as-deposited	2.22
100	2.23
200	2.25
300	2.22
400	2.16
500	2.22

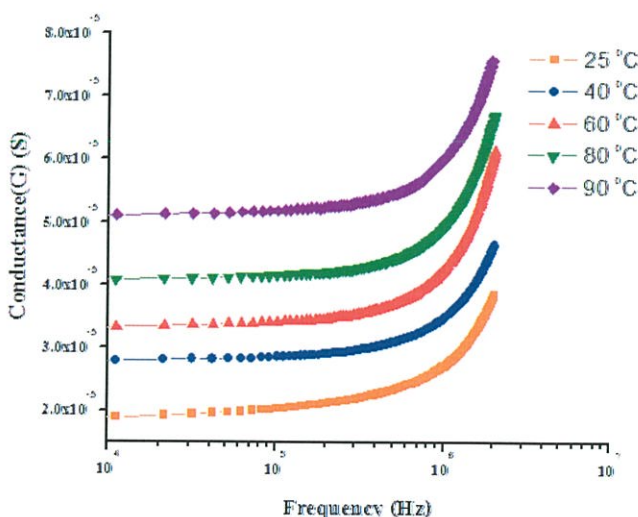


รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

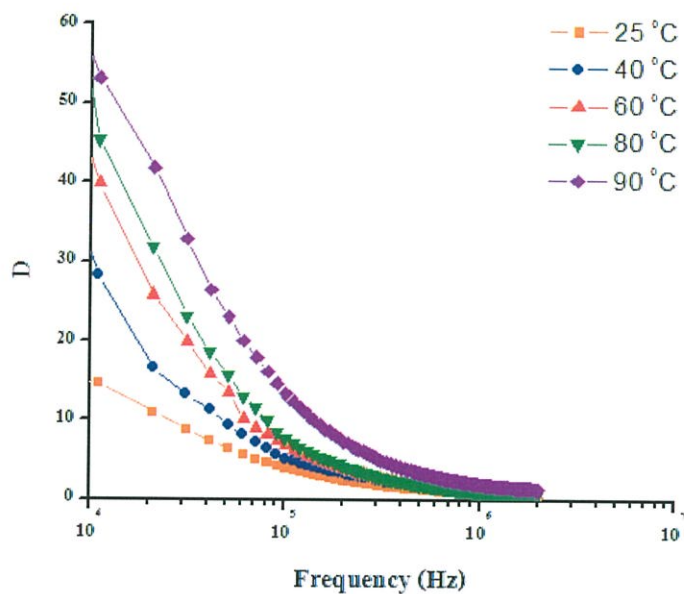
4.7 ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



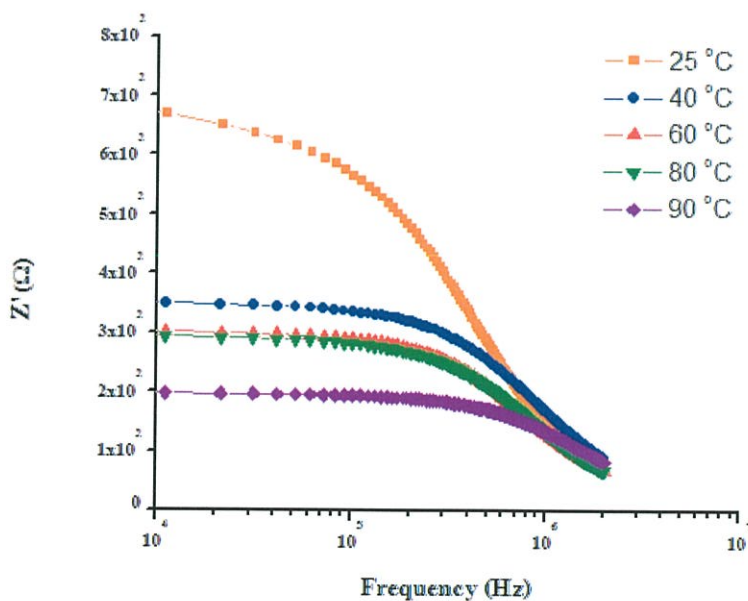
รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



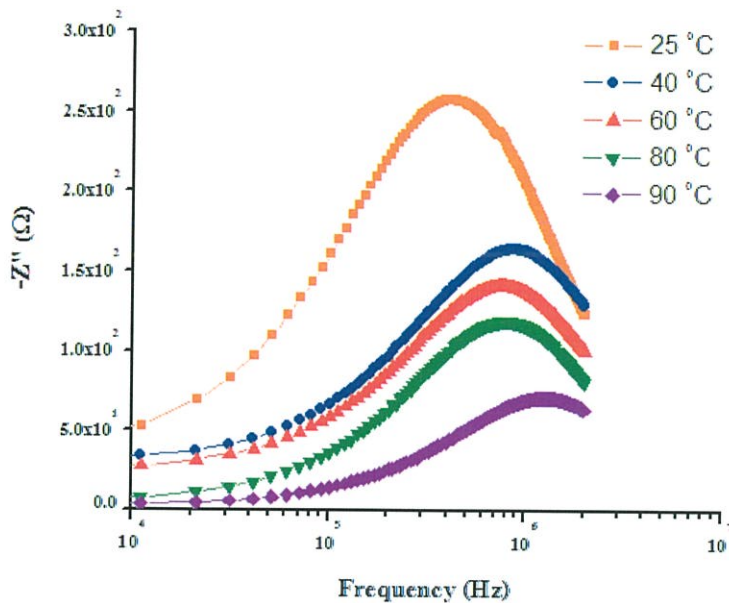
รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



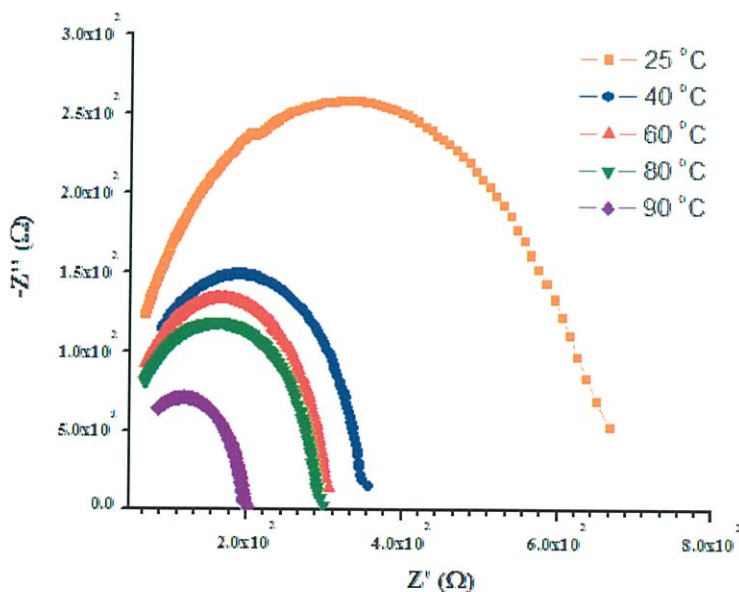
รูปที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูญเสียไดอิเล็กตริกกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



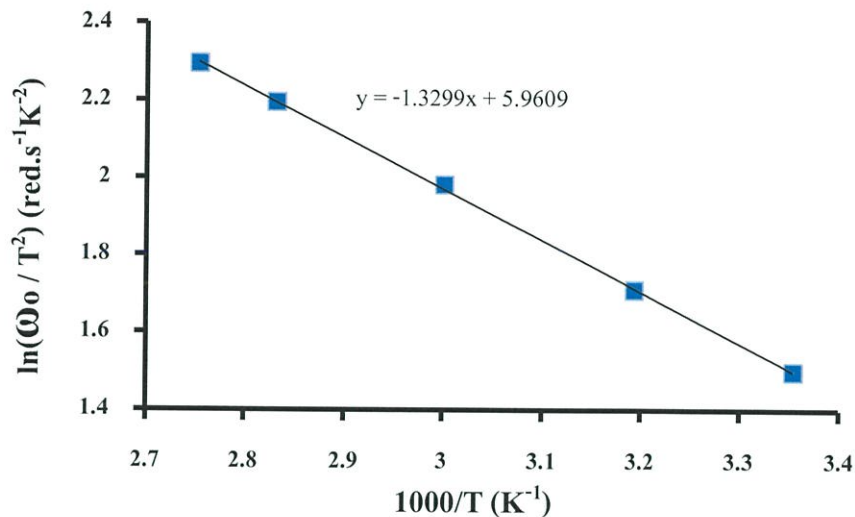
รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนिलในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



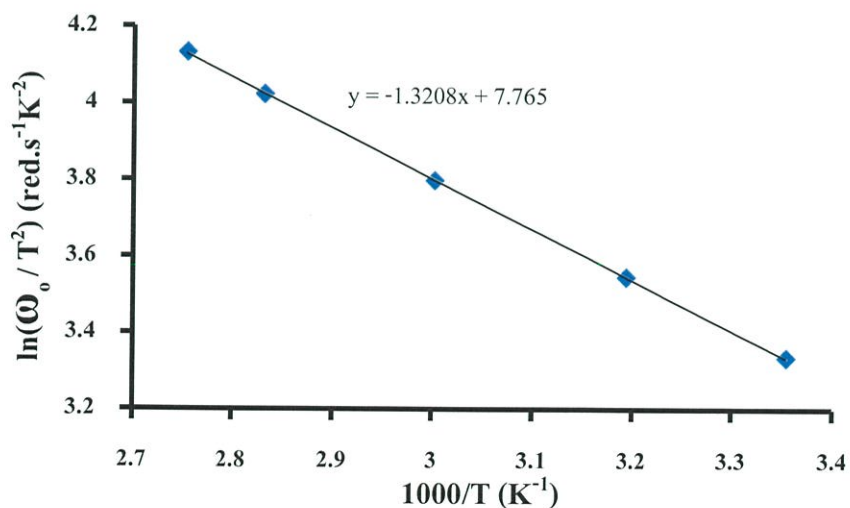
รูปที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0 / T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจลนภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(\omega_0 / T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ที่ได้จากการหาค่า  $\omega_0$  ของกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การหาค่า  $\omega_0$  จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมแล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ ส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.5)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.6a)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการที่ (4.6a) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\xi_0 \quad (4.6b)$$

จุดตัดแกน y นั้นจะได้ค่า  $\ln\xi_0$  แล้วสามารถหาค่า  $\sigma_T$  ได้จากสมการความสัมพันธ์

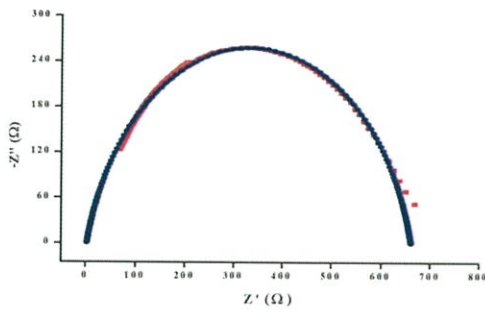
$$\begin{aligned} \xi_0 &= 2\sigma_T v_{th} N_v \\ \sigma_T &= \frac{\xi_0}{2v_{th} N_v} \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $\xi_0$  คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน  $\sigma_T$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

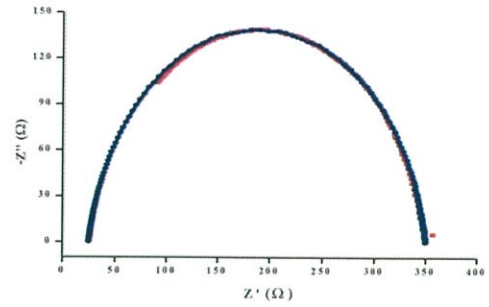
ค่าพลังงานกระตุ้น  $E_a$  สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์  $\ln(\omega_0/T^2)$  กับ  $(1000/T)$  ซึ่ง  $\omega_0$  สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็พบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ค่าของ  $\xi_0$  และ  $\sigma_T$  นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เมื่อ  $\xi_0$  คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน  $\sigma_T$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้นและตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากสองวิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำCuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

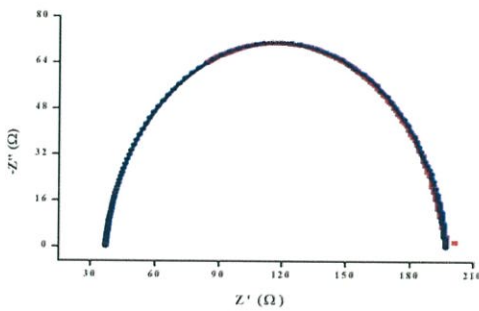
Method	T (°C)	$\omega_0$ (red/s)	$E_a$ (eV)	$\xi_0$ (s <sup>-1</sup> K <sup>-2</sup> )	$\sigma_T$ (cm <sup>-2</sup> )
$Z'' - f$	25	398,066.45	0.115	387.96	$1.94 \times 10^{-15}$
	40	541,747.84			
	60	804,180.22			
	80	1,119,095.98			
	90	1,307,420.95			
$Z' - Z''$	25	2,499,857.31	0.114	2,356.66	$1.18 \times 10^{-24}$
	40	4,030,176.42			
	60	5,716,559.79			
	80	7,404,722.74			
	90	8,210,603.57			



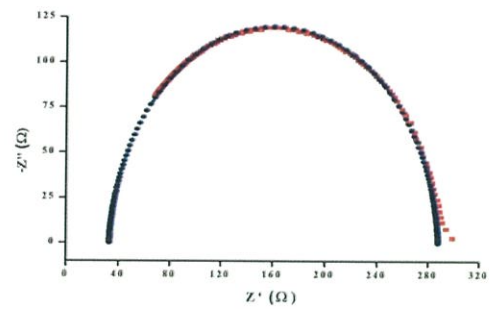
25 °C



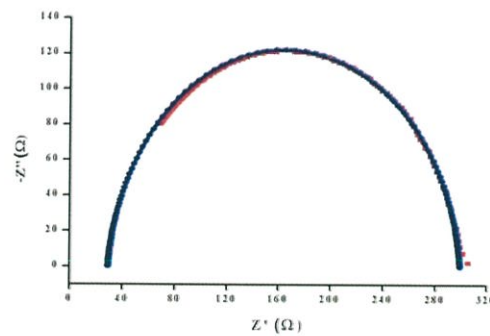
40 °C



60 °C



80 °C



90 °C

รูปที่ 4.51 การจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

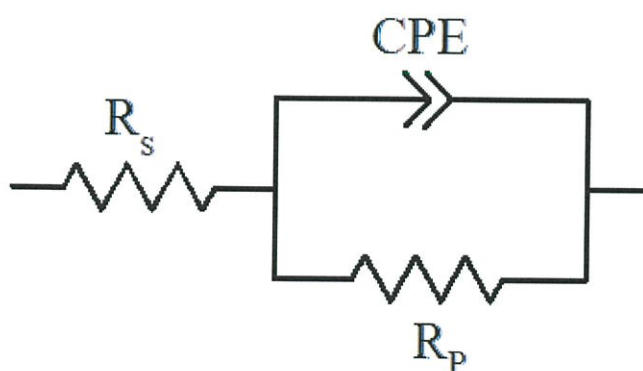
ในรูปที่ 4.51 แสดงการจำลองแบบของกราฟ โคล-โคล (Cole-Cole plot) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้กราฟรูปครึ่งวงกลมที่เทียบเคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก โดยจะแสดงดังสมการ (Barsoukov and Macdonald, 2005)

$$\left[ Z' - \left( R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + [Z'']^2 = \left( \frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (4.8)$$

จากการจำลองแบบทำให้สามารถคำนวณหาค่าความจุของรอยต่อ ความต้านทานอนุกรมของวงจรสมมูล และค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดได้ ซึ่งพบว่าค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และค่าความถี่ที่สอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดนั้นจะเลื่อนไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน ส่วนในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะได้จากสมการ

$$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p} \quad (4.9)$$

ช่วงชีวิตของพาหะจะหาได้จากสมการ  $\tau = R_p C_p$  และค่าความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์สูงสุดคือ  $\omega = 2\pi f_{\max}$



รูปที่ 4.52 วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการอธิบายถึงการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Temperature (°C)	Simulated Parameters		Extracted Parameters				
			$C_p = \frac{(P_1 R_p)^{\frac{1}{n_1}}}{R_p}$ (F)	$\tau = R_p C$ (s)	$f_{\max}$ (measured value) (Hz)	$\omega = 2\pi f_{\max}$ (rad)	$\omega \tau$
25	CPE	$R_p = 658 \ \Omega$	$3.82 \times 10^{-10}$	$2.51 \times 10^{-7}$	$6.00 \times 10^5$	$3.77 \times 10^6$	0.95
		$P_1 = 9.0 \times 10^{-10}$					
		$n_1 = 0.847$					
	$R_s$	$3 \ \Omega$					
40	CPE	$R_p = 325 \ \Omega$	$5.11 \times 10^{-10}$	$1.66 \times 10^{-7}$	$8.90 \times 10^5$	$5.59 \times 10^6$	0.93
		$P_1 = 9.0 \times 10^{-10}$					
		$n_1 = 0.9$					
	$R_s$	$25 \ \Omega$					
60	CPE	$R_p = 160 \ \Omega$	$1.11 \times 10^{-9}$	$1.78 \times 10^{-7}$	$9.00 \times 10^5$	$5.65 \times 10^6$	1.00
		$P_1 = 9.0 \times 10^{-10}$					
		$n_1 = 0.925$					
	$R_s$	$25 \ \Omega$					
80	CPE	$R_p = 255 \ \Omega$	$6.81 \times 10^{-10}$	$1.74 \times 10^{-7}$	$9.10 \times 10^5$	$5.71 \times 10^6$	0.99
		$P_1 = 9.0 \times 10^{-10}$					
		$n_1 = 0.96$					
	$R_s$	$33 \ \Omega$					
90	CPE	$R_p = 270 \ \Omega$	$2.67 \times 10^{-10}$	$7.21 \times 10^{-8}$	$2.20 \times 10^6$	$1.38 \times 10^7$	0.99
		$P_1 = 9.0 \times 10^{-10}$					
		$n_1 = 0.937$					
	$R_s$	$29 \ \Omega$					

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการงานพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ  $Cu_2O$  ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลแดง โดยใช้มวลสารตั้งต้นเท่ากับ 0.3 กรัม จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อีกทั้งศึกษาสมบัติทางแสงและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า กระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศนั้นจะนำไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำการศึกษาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ เพื่อให้ได้เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี โดยใช้แบบจำลองของวงจรที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับความต้านทานชัณฑ์ (shunt resistance) โดยมีความต้านทานภายนอกอีกตัวหนึ่งมาทำหน้าที่เป็นความต้านทานอนุกรม (series resistance)

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ไม่มีการแอนนัลและเมื่อแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส เนื่องจากไม่พบพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟส CuO แต่จะปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟส Cu ที่มีมุม  $2\theta = 43.298$  องศา และมุม  $2\theta = 50.434$  องศา ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระนาบ (111) และ (200) ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส เนื่องจากไม่ปรากฏพีคของระนาบโครง

ผลึกใดๆ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส พบว่าพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สอดคล้องกับเฟส CuO ที่มุม  $2\theta = 35.495$  องศา และมุม  $2\theta = 38.686$  องศา ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระนาบ (-111) และ (111) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก แสดงว่าการแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีแนวโน้มที่จะพบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับเฟสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เพิ่มมากขึ้น

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO พบว่ามีกลุ่มก้อนของผลึก (cluster) กระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กลุ่มก้อนเหล่านี้มีขนาด 600 – 800 นาโนเมตร กระจายอยู่ห่างๆกัน ส่วนพื้นหลัง (background) เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยเช่นกันแต่มีเกรนขนาดเล็กกว่ามาก และเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นกลุ่มก้อนผลึกเหล่านี้จะมีขนาดเล็กลง และแพร่เข้าใกล้กันมากขึ้น ส่วนเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะมีขนาดเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกลุ่มก้อนเหล่านี้ยังคงไม่เต็มผิวหน้าของฟิล์มบาง

จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและที่แอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิแอนนีสมีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของฮอลล์ และค่าความหนาแน่นของโฮลอิสระ โดยสรุปฟิล์มบางที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีสมบัติทางไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด และช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.25 อิเล็กตรอนโวลต์

จากการศึกษาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (specific contact resistance:  $\rho_c$ ) พบว่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO กับฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 6.29 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร เมื่อผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ผลการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,000 นาโนเมตร พบว่าขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้น จากนั้นจึงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO พบว่าค่าช่องว่าง

แถบพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิแอนนิลเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงเป็น 2.22 อิเล็กตรอนโวลต์

ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิห้อง ความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$C^*(\omega) = C_\infty + \frac{C_0 - C_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $C_\infty$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง (high frequency) ส่วน  $C_0$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (low frequency) ส่วน  $\tau$  คือ เวลาผ่อนคลาย (relaxation time) สำหรับ  $\alpha$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติในวัสดุทั่วไปมักจะมีกับดักพาหะ (trap) เข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีกับดักพาหะที่มีพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface states) ความจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักจะแปรตรงกับความถี่ดังนี้ คือ

$$C_r \propto \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 + \omega^2)} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า ( $C$ ) กับความถี่ ( $f$ ) ซึ่งความถี่  $\omega_0$  นี้จะสัมพันธ์กับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (emission rate) ออกจากกับดักพาหะ

โดยที่	$\omega_0 = 2e_T$	
เมื่อ	$e_T = \frac{1}{\tau}$	
จะได้ว่า	$\omega_0 = \frac{2}{\tau} = 2N_{c,v}V_{th}\sigma_{n,p} \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)$	(5.3)

เมื่อ  $N_{c,v}$  คือ ความหนาแน่นของสถานะยังผลของแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการอัดและคายประจุออกจากกับดักพาหะ ส่วน  $V_{th}$  คือ ความเร็วของพาหะเนื่องจากพลังงาน

ความร้อน (thermal velocity) สำหรับ  $\sigma_{n,p}$  คือ ภาคตัดขวางการจับอิเล็กตรอนหรือโฮลและ  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้นที่บอกถึงความลึกของระดับพลังงานของกับดักพาหะ เมื่อเทียบกับแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง  $\omega_0$  จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้คือ

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (5.4)$$

และ

$$\xi_0 = \xi_{\infty} \exp\left(\frac{E_a}{E_{\infty}}\right) \quad (5.5)$$

ซึ่ง  $\xi_{\infty}$  และ  $E_{\infty}$  เป็นค่าคงที่ที่สอดคล้องกับกลไกการดูดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เมื่ออุณหภูมิลดลง แล้ว  $\omega_0$  ของสมการที่ (5.4) จะมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้า  $C_T$  จากสมการ (5.2) มีค่าลดลงตามอุณหภูมิด้วย ซึ่งสอดคล้องดีกับผลการทดลองของความจุไฟฟ้า (C) กับความถี่ (f) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส และในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์

ค่าความนำไฟฟ้า (G) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะปรากฏที่ความถี่ต่ำกว่า  $10^7$  เฮิร์ตซ์โดยประมาณ เป็นผลของการนำไฟฟ้ากระแสตรงของพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการจอนเซอร์ ดังนี้คือ

$$G_{ac} = G_{dc} + A\omega^n \quad (5.6)$$

แต่เมื่อความถี่สูงกว่า  $10^7$  เฮิร์ตซ์ อิเล็กตรอนในกับดักพาหะจะถูกกระตุ้น ให้หลุดออกมาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำลง ปริมาณของอิเล็กตรอนที่จะถูกกระตุ้นให้หลุดออกมามีแนวโน้มลดลงตามสมการที่ (5.5)

สำหรับค่าจำนวนจริง ( $z'$ ) และจำนวนเชิงซ้อน ( $z''$ ) ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ( $z^*$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทานชั้นที่ ( $R_p$ ) โดยมีความต้านทานภายนอกอีกตัวหนึ่งมาทำหน้าที่เป็นความต้านทานอนุกรม จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม EIS สามารถที่จะคำนวณค่า  $R_p$  และ  $R_s$  ของวงจรสมมูลได้ ซึ่งทั้งค่า  $R_p$  และ  $R_s$  มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่อุณหภูมิของการวัดเพิ่มขึ้น

ค่าความถี่เฉพาะ  $\omega_0$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจากความสัมพันธ์ของ  $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right)$  กับ  $1,000/T$  สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้ประมาณ 0.115 อิเล็กตรอน

โวลต์ ซึ่งก็คือระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดตื้น (shallow level) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ระบบสุญญากาศต้องสะอาดเพียงพอ ดังนั้นต้องทำความสะอาดทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
2. สารตั้งต้นที่จะใช้ในการระเหยสารควรทำการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเข้าสู่ระบบสุญญากาศทันที
3. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้
4. ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรทำซ้ำให้มีขนาดเล็กและอยู่ตรงมุมทั้งสี่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส
5. ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ควรวางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำให้อยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างขั้วทั้งสองของสนามแม่เหล็ก

## เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $In_xWO_3$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, 2530. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ( $CuInSe_2$ ), วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2546. ประดิษฐ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2547. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์,

รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $\text{CuAlO}_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CdS}$  โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์  $\text{CdS/CuO}$ , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คูสิต เครื่องาม, 2535. โพลีดีสเททฟิสิกส์, กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยูเคชั่น

คูสิต เครื่องาม, 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม 1, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประธาน ประจวบโชค, 2550. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuAlO}_2$  ชนิดพี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วีรชัย ลิภา, 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{CdS-ZnS}$  ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุกฤษฎี เกิดแสง, 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์  $\text{CdTe}$ , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สมเกียรติ สุขเดช, 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อุปถัมภ์ นาครัถย์, 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคีนูกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมวิธีพ่นละอองสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Al-Kuhaili, M. F., 2008. Vacuum, 82: 623–629.

Barsoukov E., Macdonald J.R. 2005. Impedance Spectroscopy Theory Experiment and Application. 2<sup>nd</sup> Edition. New Jersey : John Wiley&Sons Inc. Hoboken.

- Bugarinovic, N. et al., 2011. Cuprous Oxide as an Active Material for Solar Cells in Solar Cells- New Aspects and Solution. Edited by Leonoid A. Kosyachenko: Intech Open Science Open Minds.
- Cullity, B.D., 1956. Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company Inc. Kittel, C., 1971. Introduction to Solid State Physics, 4th. ed., New York: John, Wiley & Son.
- Dieter, K. S., 1998. Semiconductor Material and Device Characterization, 2nd. ed., New York: John Wiley & Sons Inc.
- Elangovan, E. and Ramamurthi, K., 2003. Optoelectronic properties of spray deposition SnO<sub>2</sub>: F thin films for windows materials in solar cells, J. Optoelect. Adv. Mat., 5:45-54.
- Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H., 1983. Fundamentals of Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion, New York Academic Press Inc, p. 44.
- Gangopadhyay, U., Kim K., Mangalaraj, D., Yi J., 2004. Low cost CBD ZnS antireflection coating on large area commercial mono-crystalline silicon solar cells, Applied Surface Science, 230: 364-370.
- Hearle, J. W.S., Sparrow, J.T., and Cross, P.M., 1973. The Use of the Scanning Electron Microscope, New York: Pergamon Press Ltd.
- Hsueh, T. J., Hsu, C. L., Chang, S. J., Guo, P. W., Hsiehc, J. H. and Chen, I. C., 2007. Scr. Mater., 57: 53.
- Hu, F., Chan, K., C., Yue, T., M., 2009. Th. Sol. Films, 518: 120–125.
- Itoh, T. and Maki, K., 2007. Vacuum, 81: 904 –910.
- Jeong, S. 2010. Thin Zinc Oxide and Cuprous Oxide Films for Photovoltaic Applications. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, USA.
- Kittel, C., 1971. Introduction to Solid State Physics, 4th. ed., New York: John, Wiley & Son.
- Klug, H. P. and Alexander, L. E., 1974. X-Ray diffraction Procedure for Polycrystalline and Amorphous Materials (New York: Wiley).
- Korzhavyi, P.A. and Johansson, B. 2011. Literature Review on the Properties of Cuprous Oxide Cu<sub>2</sub>O and the Process of Copper Oxidation. Technical Report Submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Lv, R., Zheng, W., Lin, L., Peng, F., Huanf, Z. and Lai, F., 2011. Physica, B., 406: 1253-1257.

- Marquardt, M.A., Ashmore, N.A. and Cann, D.P., 2006. Crystal chemistry and electrical properties of the delafossite structure, *Thin solid films*, 496: 146-156.
- Minami, T., Nish, Y., Miyata, T. and Nomoto, J. 2011. High Efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu<sub>2</sub>O Heterojunction Fabricated on Thermally Oxidized Cu<sub>2</sub>O Sheets. *Appl. Phys. Express*. 4, 02301-062304.
- Mittiga, A., Salza, E., Sarto, F., Tucci, M. and Vasanti, R., 2006. *Appl. Phys. Lett.*, 88: 163502.
- Muhibbullah, M. 2012. Deposition of Copper Oxide Thin Films by Chemical Techniques. Thesis for Doctor of Engineering Nagoya Institute of Technology, Japan.
- Nakamura, N., Ishiwary, S. and Tanaka, A., 1998. *Appl.Phys.Lett.*, 73: 23-25.
- Nair, M. T. S., Guerrero, L., Arenas, O. L. and Nair, P. K., 1999. *Appl. Surf. Sci.*, 150: 143– 151.
- Necmi, S., Tulay, S., Seyda, H. and Yasemin, C., 2005. *Semicond. Sci. Technol.*, 20: 398–401.
- Olsen, L. C., Addis, F. W. and Miller, W., 1982-1983. *Solar Cells*, 7: 247.
- Porat, O., and Riess, I., 1995. *Solid State Ionics*, 81: 29.
- Paul, G. K., Ghosh, R., Bera, S. K., Bandyopadhyay, S., Sakurai, T. and Akimoto, K., 2008 *Chem. Rakhshani*, A.E. 1986. Preparation, Characteristics and Photovoltaic Properties of Cuprous Oxide- A Review. *Solid State Elec.* 29(1), 7-17.
- Runyan, W. R., 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*, 3rd . ed, New York: Mc. Graw-Hill.
- Sheng, H., Hong-Ying, C., Lien-Teng, K., Cheng-Hsien, T., 2008. *Th. Sol. Films*, 517: 1195–1199.
- Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd . ed., John Wiley & Sons New York.
- Tauc, J., 1970. *Optical properties and Solids* (Amsterdam: North-Holland).
- Tilley, J.D., 2004. *Understanding Solids: The Science of Materials*, Chichester : John Wiley&Son.
- Tsur, Y., and Riess, I., 1998. *Z. Phys. Chem.*, 207: 181. *Phys. Lett.*, 463: 117.
- Tsur, Y., and Riess, I., 1999. *Phys. Rev.*, B., 60: 8138.
- van der Pauw L.J., 1958. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape, *Philips Res. Reports*, 13 : 1-9.
- Weichman, F. L. and Reyeas, J. M., 1980. *Can.J.Phys.*, 58: 325.
- Wijesundera, R. P., Hidaka, M., Koga, K., Sakai, M. and Siripala, W. 2006. *Th. Sol. Films*, 500: 241–246.
- Wang, R. C. and Lin, H. Y., 2010 *Sens., Actuators, B.*, 149: 94.

ภาคผนวก

ตารางไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



Pattern : 80-1916		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated			
* Cu O						
Copper Oxide						
Lattice : Monoclinic		Mol. weight = 79.55				
S.G. : Cc (9)		Volume [CD] = 81.50				
a = 4.69270		Dx = 6.483				
b = 3.42830	Beta = 99.55					
c = 5.13700						
a/b = 1.36881	Z = 4	Ucor = 3.88				
c/b = 1.49841						
ICSD COLLECTION CODE : 069757						
TEMPERATURE FACTOR : ATF						
REMARKS FROM ICSD : REM TEM Mentioned.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :						
*J. Phys.: Condens. Matter, volume 3, page 8173, (1991) ;						
Asbrink, S., Waskowska, A.						
Radiation : CuK $\alpha$ 1	Filter : Not specified					
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings					
		2th	l	h	k	j
		32.476	7	1	1	0
		35.495	95	-1	1	1
		38.686	100	1	1	1
		38.891	29	2	0	0
		46.193	2	-1	1	2
		48.659	28	-2	0	2
		51.313	1	1	1	2
		53.407	10	0	2	0
		56.642	1	0	2	1
		58.250	14	2	0	2
		61.458	18	-1	1	3
		65.723	13	0	2	2
		66.144	14	-3	1	1
		67.848	8	1	1	3
		68.008	15	2	2	0
		68.789	<1	-2	2	1
		71.574	<1	-3	1	2
		72.320	6	3	1	1
		72.864	<1	2	2	1
		74.923	5	0	0	4
		75.129	8	-2	2	2
		79.634	<1	0	2	3
		80.050	2	-2	0	4
		82.228	4	-3	1	3
		82.973	3	2	2	2
		83.490	3	3	1	2
		*83.490	3	4	0	0
		86.404	1	-4	0	2
		86.617	1	-2	2	3
		87.904	<1	1	1	4
		*87.904	<1	1	3	0
		89.633	4	-1	3	1

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาววรรณิสา ศรีโสดา
เกิดเมื่อ	วันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2534
ภูมิลำเนา	จังหวัดศรีสะเกษ
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ. 2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสตรีศรีเกษ ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง