

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีพ่นละออง  
สารเคมี

4



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

81611

2พ.  
พ.1647  
2550

b. 119 33525  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Study of Tin Sulfide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Method



Mr. Pongharin Piemongsant  
Miss. Pattaraporn Sandkum  
Miss. Supika Losakunchai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

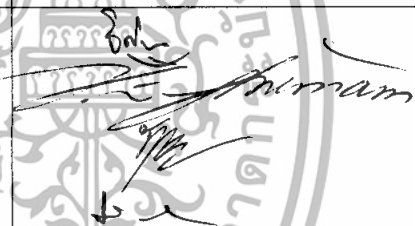
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีพ่นละออง  
 สารเคมี  
**นักศึกษา** นายพงษ์พรินทร์ เปี่ยมพงษ์สานต์  
 นางสาวภัทรพร แสนคำ  
 นางสาวศุภิกา โฉ่สกุลชัย  
**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ	ผศ.ดร. ชัยสิทธิ์ ภูรัญเกียรติ	
กรรมการ	อ.ณัฐพร พรหมรส	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)  
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียม โดยวิธีพ่น ละอองสารเคมี
นักศึกษา	นายพงษ์หิรินทร์ เปี่ยมพงษ์สานต์ นางสาวภัทราพร แสนคำ นางสาวศุภิกา โล่สกุลชัย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ

#### บทคัดย่อ

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ (SnS) ทั้งที่ไม่ได้เจือและที่เจือด้วยอะตอมของ Cu เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกใสที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี สารละลายที่ใช้เคลือบฟิล์มบางเตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งของ  $\text{SnCl}_2$  และ เอ็น-เอ็น ไดเมทิล ไร โอยูเรียที่มีความเข้มข้นในปริมาณเท่ากันคือ 0.1 โมลาร์ ทำการละลาย  $\text{SnCl}_2$  ลงในตัวทำละลายที่เกิดจากการผสมของ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และน้ำปอลอดประจุในอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร ส่วนเอ็น-เอ็น ไดเมทิล ไร โอยูเรียจะละลายในน้ำปอลอดประจุ และใช้  $\text{CuCl}_2$  เป็นสารเจือด้วยความเข้มข้น 0.05-10.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โครงสร้างผลึกและผิวหน้าของฟิล์มบางจะศึกษาได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางจะคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ของฮอลล์จะใช้วิธีของแวนเดอร์เพอร์ จากปรากฏการณ์ของฮอลล์ที่อุณหภูมิห้องพบว่าฟิล์มบางทั้งที่ไม่เจือและที่เจือด้วยอะตอมของ Cu จะมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Study of Tin Sulfide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Method
<b>Name</b>	Mr. Pongharin Piempongsant Miss. Pattaraporn Sankum Miss. Supika Losakunchai
<b>Department</b>	Applied Physics Faculty of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Academic Year</b>	2007
<b>Special Project Advisor</b>	Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

#### ABSTRACT

Undoped SnS and SnS thin films doped with Cu have been deposited on slide-glass substrates at temperature 370 °C by spray pyrolysis method. The starting solution was prepared using SnCl<sub>2</sub> and n, n-dimethyl thiourea, each of 0.1 M concentration. SnCl<sub>2</sub> was dissolved in a mixture of isopropyl alcohol and deionized water, which was in the ratio 3:1 (by volume) while n, n-dimethyl thiourea dissolved in deionized water. CuCl<sub>2</sub> dopant concentration was varied in the range 0.05–10.0 wt%. The crystal structure and surface morphology of the films were studied by XRD and SEM. Energy gap values of the films were evaluated from the optical transmission spectra. Electrical resistivity and Hall effect measurements were performed with van der Pauw configuration. From Hall effect measurements at room temperature, electrical conduction of all samples are n-type.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ อาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมารวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุ่มใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Heλ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $Cu_{K\alpha}$  เท่ากับ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคและกึ่งโครงสร้างผลึกแบบสองกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิสสิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านตา-มองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณจุฑามาศ วัฒนานุรักษ์ คุณประธาน ประจวบโชค และ คุณณัฐวัฒน์ ทุมเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นายพงษ์หริินทร์ เปี่ยมพงษ์สานต์  
นางสาวภัทราพร แสนคำ  
นางสาวศุภิกา โล่สกุลชัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	18
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	22
2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	22
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	23
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก	25
2.5.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่อง	29
2.5.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	31
2.5.3.1 วิธีวัดโดยตรง	31
2.5.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	32
2.5.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	34
2.5.3.4 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วเชิงเส้นหรือสี่ขั้วเชิงเส้น	35
2.5.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้วิธีขั้วความร้อน	37
2.5.5 ปราคกณณ์ฮอลล์	38
2.5.6 การวัดปราคกณณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	43
2.5.7 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	45
2.5.8 กลไกการกระเจิงพาหะ	47
2.5.8.1 การกระเจิงของเลตทิซหรือการกระเจิงแบบอะคูสติก	47
2.5.8.2 การกระเจิงแบบโพลาไรซ์หรือการกระเจิงแบบออปติคัล	48
2.5.8.3 การกระเจิงของไอออนสำหรับสารกึ่งตัวนำแบบนอนดิเจนเนอเรต	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.8.4 สารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออะตอมของสารเจืออย่างหนัก	48
2.5.8.5 การกระเจิงของอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้า	50
2.5.8.6 การกระเจิงบริเวณขอบของเกรน	50
2.6 กระบวนการการเกิดฟิล์มบาง	51
2.7 ทฤษฎีของครูด	54
บทที่ 3 การดำเนินงานทดลอง	56
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	56
3.1.1 อุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี	56
3.1.2 การศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการ	57
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี	58
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับ	58
3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยการพ่นละอองสารเคมี	59
3.2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมโดยการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	61
4.1 ฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่น ฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	61
4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียม โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370°C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียม โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	64
4.1.3 การตรวจสอบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียม โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	66
4.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละออง สารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลา ในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก	80
ภาคผนวก ข	82
ภาคผนวก ค	85
ประวัติผู้เขียน	88

## สารบัญตาราง

	หน้า
4.1 แสดงขนาดของเกรนที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จูลทรศน์อิลีกตรอนแบบ สองกราดของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่น ฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	63
4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดย ให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	68
4.3 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่น ละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการ พ่นละอองสารเคมี 2 นาที	70
4.4 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิ แผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	70
4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิ แผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	75

## สารบัญรูป

	หน้า
2.1 รูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 3 มิติ	8
2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของ SnS และ SnS <sub>2</sub>	9
ก. แบบออร์โธโรมบิกของ SnS	
ข. แบบเฮกซะโกนอลของ SnS <sub>2</sub>	
2.3 การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก	11
2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่าย	12
2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ (T = 0 K)	13
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	
2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ (T=0 K)	14
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.7 แสดงแผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง	15
2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่พิจารณาถึงรีฟเลกทีวิตีของฟิล์มบาง	17
2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก	20
2.10 เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	20
2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	26
2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดตรง	31
2.15 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
2.16 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	34
ก. แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้นโดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. แสดงกราฟที่ได้จากการวัดโดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.17 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน	38
2.18 ปราบกฎการณัฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น	39
ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x	
ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x	
2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d\Delta R$ กับ B เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์	43
2.20 สารตัวอย่างแผ่นบางรูปทรงใดๆ	44
2.21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง	45
2.22 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	46
2.23 แสดงการลดลงของขนาดของหยดสารละลายตามระยะทางจากฐานรองรับ	52
2.24 แบบจำลองการเกิดฟิล์มบางบนผิวของแผ่นฐานรองรับ	53
ก. การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียน้ำ	
ข. การเกิดฟิล์มบางบนแผ่นฐานรองรับ	
2.25 แสดงการรวมตัวของฟิล์มบางที่เกิดจากวิธีการพ่นละอองสารเคมี	53
2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E(\omega)$ กับ $\omega/\omega_p$	55
3.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี	57
3.2 แสดงระบบวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า	60
3.3 แสดงระบบการศึกษาปรากฏการณัฮอลล์	60
4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ใน [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	62
4.3 แสดงขนาดของเกรนของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	64
4.4 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	65
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	67
4.6 แสดงกราฟช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	68
4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	71

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.8 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	71
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d\Delta R$ กับ B ของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	72
4.10 แสดงค่าสภาพคล่องฮอลล์ ปริมาณพาหะข้างมาก และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	73
4.11 แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	73
4.12 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	74
4.13 แสดงระดับพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl <sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที	75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

เนื่องจากทุกวันนี้เราใช้พลังงานกันอย่างสิ้นเปลืองมาก ในอีกไม่นานพลังงานที่เรานำมาใช้ไม่ว่าจะผลิตจากถ่านหินหรือจากเชื้อเพลิงก็จะหมดไป เพราะฉะนั้นเราจึงพยายามค้นหาพลังงานทดแทนซึ่งเป็นขุมพลังที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากนำมาใช้ในการจ่ายอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการดำรงชีวิต ไม่ว่าจะเป็นการสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในชีวิตประจำวัน (ปกรณ.2550)

พลังงานทดแทนที่เราจะกล่าวถึงนี้ก็คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (<http://www.teenet.chula.ac.th>) แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand alone system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV grid connected system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง อุปกรณ์ที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV hybrid system)

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกรออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนตดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบของระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือ PV มีชื่อเรียกกันไปหลายอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์สุริยะ หรือเซลล์โฟโตโวลต์ทาคิก (photovoltaic cell) โดยแยกออกเป็น โฟโต หมายถึง แสง และ โวลต์ หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำแล้วหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนเซลล์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1954 จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียม ในอวกาศเมื่อปี ค.ศ. 1959 ดังนั้นสรุปได้ว่า

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (silicon) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide) อินเดียมฟอสไฟด์ (indium phosphide) แคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (copper indium diselenide) เป็นต้น เมื่อแสงอาทิตย์ที่มีพลังงานโฟตอน ( $h\nu \geq E_g$ ) ตกกระทบบริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างพาหะอิสระที่เป็นคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมาตรงบริเวณรอยต่อนั้น ซึ่งจะถูกกวาดออกไปจากบริเวณรอยต่อโดยสนามไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อ โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกกวาดไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และโฮลจะถูกกวาดไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นตรงใกล้ ๆ กับบริเวณรอยต่อนั้น เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงภายนอก กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งตามวัสดุที่ใช้เป็น 3 ชนิดหลักๆ (<http://www.teenet.chula.ac.th>) คือ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (single crystalline silicon solar cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ monocrystalline silicon solar cell และชนิดผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline silicon solar cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon solar cell) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) นานักเบามาก และประสิทธิภาพเพียง 5-10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนต์ แคดเมียมเทลลูไรด์ และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (single crystalline) และผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนต์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25% (ปกรณ,2550)

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนโลก คือ ซิลิกอน จึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิกอนมาถู และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งจะมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีซึ่งจะมีพาหะข้างมากเป็นโฮล ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน อาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 มม.) ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมที่มีการนำไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่ได้รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

พี่น้องตระกูล Reddy (Reddy Koteeswara and Reddy Ramakrishna, 2006) ได้ศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบที่อาจจะประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์สารประกอบในกลุ่มของเกลือซัลไฟด์ที่โคโคเด่นคือ SnS ที่จะนำไปประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงได้ เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงที่เหมาะสม SnS เป็นสารประกอบในกลุ่ม IV-VI ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิก ที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมากกว่า  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  และมีช่องว่างแถบพลังงาน เท่ากับ 1.3 eV ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีและสามารถควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าได้โดยการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cl, Ag และ Sb นอกจากนี้การเตรียมฟิล์มบาง SnS ยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำเนื่องจาก Sn และ S เป็นธาตุที่มีมากในประเทศไทย และสารประกอบ SnS เสถียรมากไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม SnS ยังไม่ได้รับการศึกษากันอย่างแพร่หลายทั้งในรูปแบบผลึกเดี่ยวและฟิล์มบาง กระบวนการผลิตฟิล์มบาง SnS สามารถทำได้หลายวิธี เช่น สเปคเตอรึง การระเหยในระบบสุญญากาศ การเตรียมโดยเคมีไฟฟ้า และการพ่นละอองสารเคมีซึ่งแต่ละกระบวนการ จะมีต้นทุนในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป และประสิทธิภาพที่ได้จากแต่ละกระบวนการผลิตก็แตกต่างกันออกไปด้วย

นอกจากนี้การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้จะมีค่าความต้านทานแผ่นที่ต่ำ และมีความสามารถในการส่งผ่านแสงที่สูง จากสมบัติตรงนี้วิธีการพ่นละอองสารเคมีจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnS ทั้งที่ไม่ได้เจือและเจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยนำหนักเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อประดิษฐ์เป็นชั้นดุกกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการเตรียมด้วยกระบวนการพ่นละอองสารเคมีนี้เป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ และวิธีการไม่ซับซ้อนยุ่งยากอีกทั้งยังสามารถเตรียมได้ครั้งละมากๆ เหมาะสำหรับกระบวนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง SnS ทั้งที่ไม่ได้เจือและเจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_K\alpha$  เท่ากับ  $1.5406\text{ \AA}$
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ โดยทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลเนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101PC
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์
- 1.2.6 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ เพื่อคำนวณหาปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากและสภาพคล่องฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1.3.1 เตรียมฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.3.2 นำฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์คือ
- ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
  - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
  - ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง
  - ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์
  - ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อคำนวณหาปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากและสภาพคล่องฮอลล์

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเตรียมฟิล์มบาง จัดเตรียมวัสดุต่างๆ สารเคมีและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnS และฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.4.2 ศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มี ความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  เท่ากับ 1.5406 Å
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- เครื่องวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง โดยทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101PC
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีการแวนเดอร์เพาว์
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4.3 ทำการเตรียมฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่ได้เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 370 °C

1.4.4 ทำการศึกษาสมบัติฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่ได้เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 370 °C ที่เตรียมได้คือ

- ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  เท่ากับ 1.5406 Å
- ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
- ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง โดยทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101PC
- ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการแวนเดอร์เพาว์
- ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อคำนวณหาปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากและสภาพคล่องฮอลล์

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยและสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnS ทั้งที่เจือและไม่เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt% โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ  $370\text{ }^\circ\text{C}$
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้
- 1.5.3 ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง SnS ให้มีคุณภาพ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

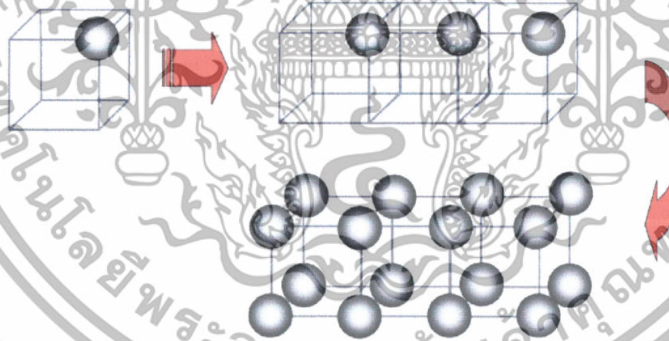
### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี ซึ่งจะได้อธิบายทฤษฎีและหลักการในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 โครงสร้างผลึก

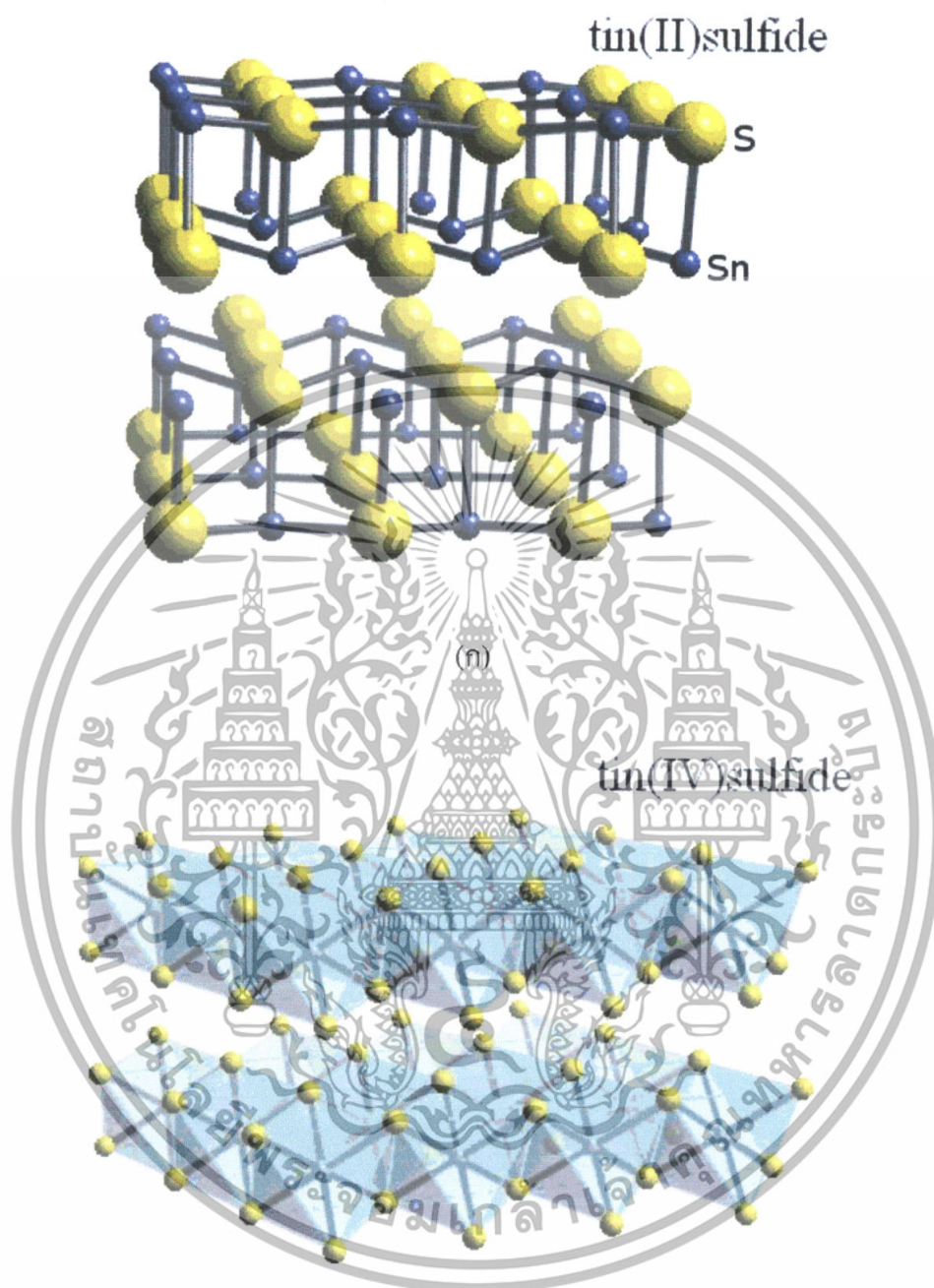
##### 2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2547; Fantini and Torriani, 1986)

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยูของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึกนั้น โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำคิบุกซ์ลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก ดังรูปที่ 2.2 (ก)



รูปที่ 2.1 รูปแบบการจัดเรียงตัวแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๗)

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของ  $\text{SnS}$  และ  $\text{SnS}_2$

ก. แบบออร์โธโรมบิกของ  $\text{SnS}$

ข. แบบเฮกซะโกนอลของ  $\text{SnS}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 สมบัติพื้นฐานของดีบุกซัลไฟด์

ดีบุก (Sn) เป็นธาตุในหมู่ 4 ของตารางธาตุสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นดีบุกไอออน ( $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Sn}^{4+}$ ) และรวมตัวกับสารอินทรีย์ เช่น ออกซิเจนหรือคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบขึ้น ซึ่งมีชื่อเรียกต่างกันตามประจุของดีบุก คือ สารประกอบของ  $\text{Sn}^{2+}$  เรียกว่า สารประกอบสแตนนียส (stannous compound) ส่วนสารประกอบของ  $\text{Sn}^{4+}$  เรียกว่า สารประกอบสแตนนิก (stannic compound) สารประกอบทั้งสองจะมีสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของสารประกอบ SnS กับ  $\text{SnS}_2$

สมบัติของสาร	SnS	$\text{SnS}_2$
มวลโมเลกุล (g/mol)	150.776	182.842
โครงสร้าง	ออร์โธโรมบิก	เฮกซะโกนอล
ความหนาแน่น ( $\times 10^3 \text{ g/cm}^3$ )	5.080	4.5
สถานะ	ของแข็ง	ของแข็ง
สี	เทา	เหลือง
จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	1,210	-
จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	880	600

## 2.1.3 ดัชนีมิลเลอร์ (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2543; ฐิตินัย, 2546)

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นในรูปของค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่ชื่อ มิลเลอร์ (Miller)

### 2.1.3.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะบอกด้วยค่าดัชนีที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (h, k, l)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.3 การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก

#### 2.1.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุดภายในผลึกจริง (real crystal) (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543)

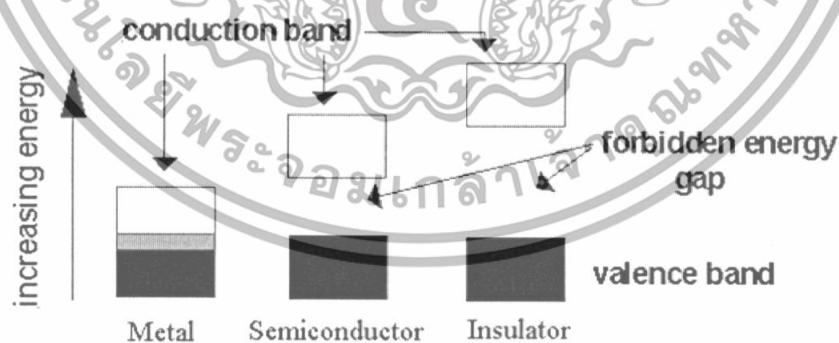
ผลึกจริง (real crystal) เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบวาแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซัปสติวชัน (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึก อีกทั้งยังมีเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) หรืออาจทำหน้าที่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุ หรืออาจทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินของประจุ ดังนั้นจึงอาจมีผลทำให้การนำกระแสของประจุเปลี่ยนแปลงไป เขตรอยต่อของเกรนอาจทำหน้าที่เป็นกับดักประจุกักอะตอมโมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัวไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

### 2.2.1 ลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงาน (Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545)

โดยทั่วไปนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ ว่าเป็น ฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือเป็นตัวนำ ลักษณะของโครงสร้างพลังงานแบบง่าย แสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) ในแถบวาเลนซ์สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาเคลวินจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและมีแรงทางไฟฟ้าสถิตยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำจะมีอิเล็กตรอนอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลย และเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณต้องห้ามหรือแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden gap) ซึ่งจะเรียกความกว้างของช่องว่างนั้นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะถูกนำมาใช้แบ่งแยกสารต่างๆ เช่น ฉนวนจะมีช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า 3 eV และสารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่า 3 eV และตัวนำไม่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง

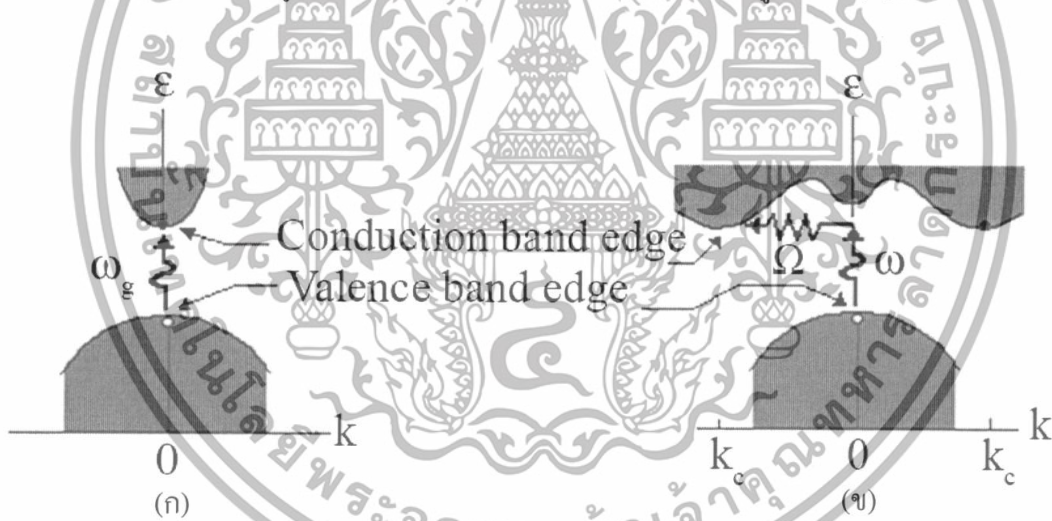


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบง่าย

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $h\omega = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ เป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือไม่มีการสร้างหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

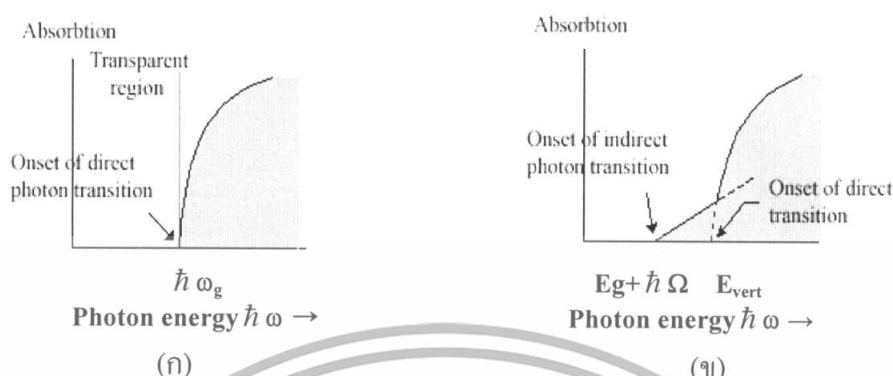
ทำลายโฟนอนดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.6(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ไม่ตรงตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากับกับจุดต่ำสุดของแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้จะมีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอนที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $k \cong k_c$  ออกมาจึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g = \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{vert}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ )

- ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง  
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ )

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

### 2.2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Abelas F., 1972)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งชนิดยินยอมและชนิดต้องห้ามได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\hbar}{n} \left[ \frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

$$(\alpha_{hv}) \equiv A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

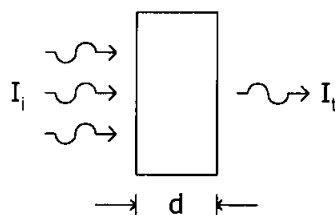
$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\hbar}{n} \left[ \frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}}$$

$$(\alpha_{hv}) \equiv A'(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ มวลลดทอนของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (the reduced electron-hole mass)  
 $H_{cv}$  คือ ค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสงระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ  
 $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน  
 $h\nu$  คือ พลังงานโฟตอน  
 $n$  คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง

2.2.3 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Abelas F., 1972; Runyan W. R., 1975)

สำหรับในการทดลองเราสามารถจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านแสงของสารตัวอย่าง โดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ส่งผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ดูเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1-R^2 e^{-2\alpha d})} \quad (2.4)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.5)$$

- เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน  
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน  
 $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 $I_t$  คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง  
 $I_i$  คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ  
 d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง  
 $I_r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน  
 n คือ ดัชนีหักเห

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่  $R^2 e^{-2\alpha d}$  มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (2.4) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.6)$$

ในการทดลองของการดูดกลืนแสงนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนไปน้อยมาก ในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม  $(1-R)^2$  มีค่าคงที่ และสมการที่ (2.6) สามารถเขียนได้

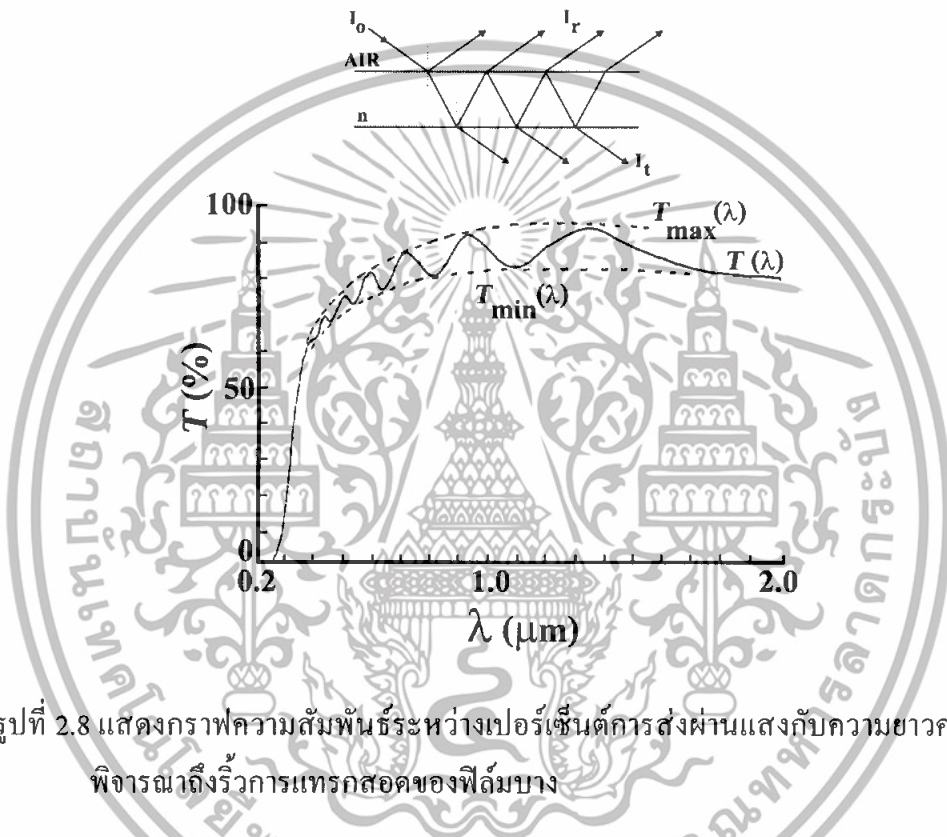
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{I_i}{I_t} \right) + \text{ค่าคงที่} \quad (2.7)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (2.7) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนที่ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง ( $\alpha$ ) และต้องนำค่านี้ออกมาจากค่า  $\alpha$  จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ความหนาของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

เมื่อแสงตกกระทบบนฟิล์มบาง จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนที่ผิวหน้าและแสงอีกส่วนจะส่งผ่านเข้ามาในฟิล์มบาง หลังจากนั้นจะเกิดการสะท้อนที่ผิวทั้งสองด้านของฟิล์มบางและทะลุผ่านออกจากฟิล์มบาง โดยแสงที่สะท้อนและหักเหออกไปจากฟิล์มนี้ก็จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกันทำให้เกิดริ้วของการแทรกสอดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่พิจารณาถึงริ้วการแทรกสอดของฟิล์มบาง

จากความสัมพันธ์นี้เราสามารถนำมาคำนวณหาขนาดความหนาของฟิล์มบางได้ดังสมการที่ (2.8)

$$t = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2(n(\lambda_1)\lambda_2 - n(\lambda_2)\lambda_1)} \tag{2.8}$$

- เมื่อ M คือ จำนวนลูกคลื่นที่อยู่ระหว่างคลื่นสองลูกที่ทำกรเลือก
- $\lambda_1, \lambda_2$  คือ ความยาวคลื่นของสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ทำกรเลือก
- $n(\lambda_1), n(\lambda_2)$  คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ณ สันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ทำกรเลือก (ประมาณว่ามีค่าเท่ากัน)

ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

$$n^2 = \frac{n_a^2 + n_g^2}{2} + 2n_a n_g T^n + \left[ \frac{(n_a^2 + n_g^2 + 4n_a n_g T^n)^2}{4} - n_a^2 n_g^2 \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

โดยที่  $T^n = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} T_{\min})$  (2.10)

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

$n_a$  คือ ค่าดัชนีหักเหของอากาศ (=1)

$n_g$  คือ ค่าดัชนีหักเหของกระจก (=1.51)

$T_{\max}$  และ  $T_{\min}$  คือ ตำแหน่งของรีวการแทรกสอดสูงสุดและต่ำสุดดังแสดงในรูป 2.8

### 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (งามนิตย์, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Moore D. M., 1989; Klug H. P., 1974)

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.2-2.5 Å เมื่อรังสีผ่านระนาบของโครงผลึกซึ่งเปรียบเสมือนเกรตติง รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.9

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) หรือเรียกว่า XRD เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัวตรวจวัดสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของ ผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ ยังสามารถนำมาหาปริมาตรคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่างได้อีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2455 วิลเลียม เฮนรี เบียร์ก์ และ วิลเลียม ลอร์เรนซ์ เบียร์ก์ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่ารังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของเบียร์ก์ (Bragg's Law) ดังสมการที่ (2.11)

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $n$  คือ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

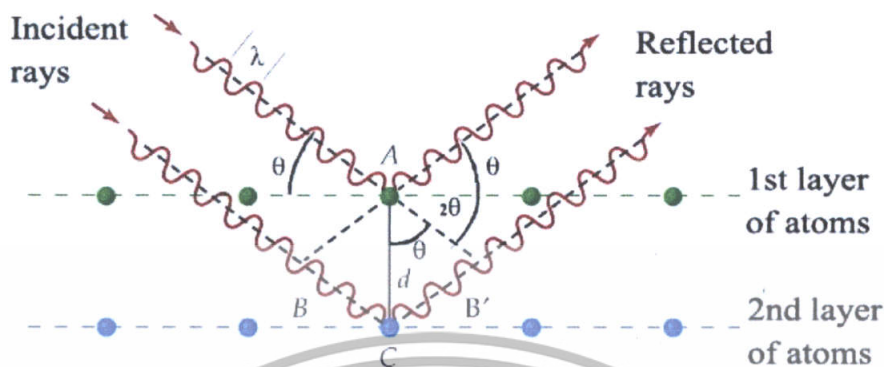
ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ โดยโครงผลึกแบบออร์โธโรมบิกสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้จากสมการที่ (2.12) และจากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) สามารถคำนวณหาขนาดของเกรนได้ดังสมการที่ (2.13)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $a, b, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก  
 $h, k, l$  คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่บอกชื่อระนาบของผลึก

$$L = \frac{(0.94\lambda)}{\beta \cos\theta} \quad (2.13)$$

- เมื่อ  $L$  คือ ขนาดของเกรน  
 $\beta$  คือ ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก  
 $2\theta$  คือ มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก



รูปที่ 2.10 เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์

**2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (งานนิพนธ์ และ คณะ 2549; Dieter K. S., 1998; Hearle J. W. S., 1973)**

ในปี พ.ศ. 2478 แมกซ์ นอลต์ ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้นและต่อมา แมนเฟรด วอน อาเคนเน ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทลีย์และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 Å

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ารอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ ทำให้สามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จากลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่าง ซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นบางให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกภาพถ่ายไมโครกราฟ (micrograph) ได้โดยตรง

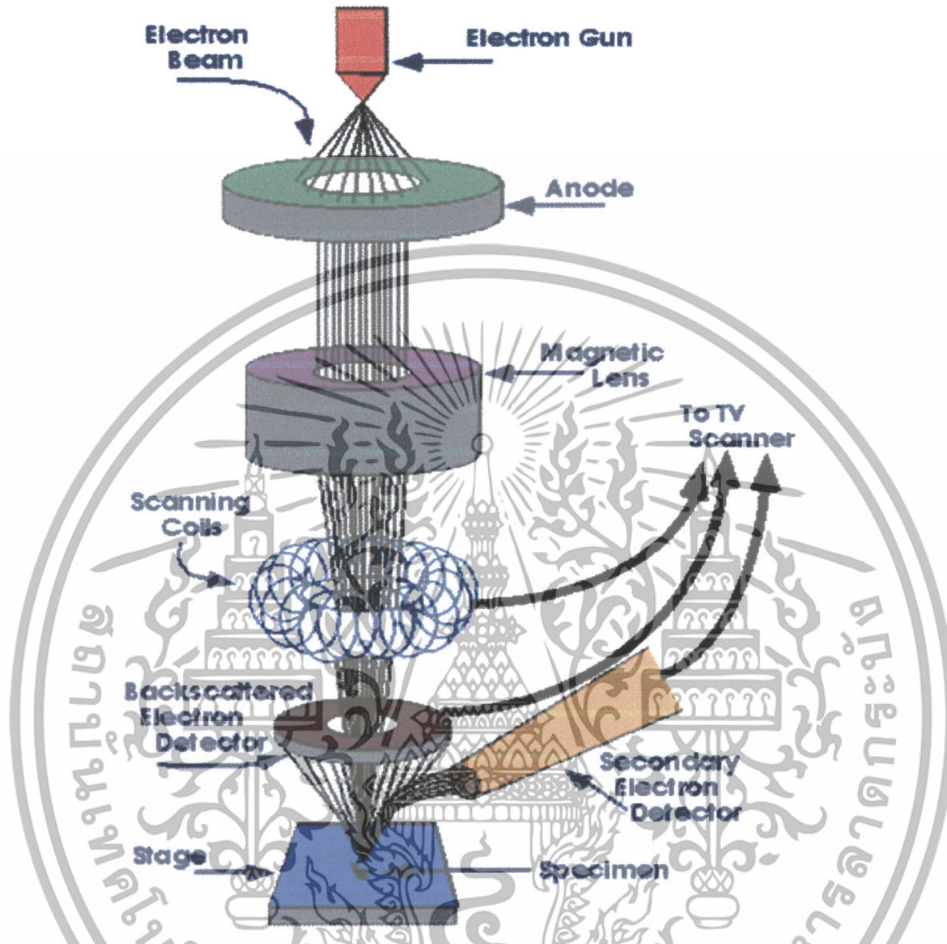
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างจากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอคาโทด (cathode ray tube : CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอของหลอดรังสีคาโทด (cathode ray tube : CRT)



รูปที่ 2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบ  $x - y$  เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

### 2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Runyan W. R. , 1975; สมฤทธิ์, 2538)

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้นสารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนการกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก

(Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/k_B T] + 1} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $f(E)$  คือ ฟังก์ชันการกระจายหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน  $E$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใดๆ แบบเฟอร์มี (fermi-dirac distribution function)

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

$k_B$  คือ ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) ที่อุณหภูมิ 0 K และกรณีที่สารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

#### 2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก

ในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K หรือสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก (intrinsic semiconductor) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_C(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (2.15)$$

เมื่อ  $N_C$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_C(E) = 2\pi \left( \frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $m_e^*$  คือ มวลยังผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนในแถบนำ

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.625 \times 10^{-34}$  J.S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.16) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์กลางอยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_{\text{top}}} n(E)dE = \int_0^{E_{\text{top}}} N_c(E)f(E)dE \quad (2.17)$$

เมื่อ  $E_{\text{top}}$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนสุดของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $k_B T$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก มากๆ จนมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำไม่อยู่ในสภาพเสื่อมสถานะ (non-degeneracy) และ  $n(E)d(E)$  มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.17) จึงสามารถขยายขอบเขต  $E_{\text{top}}$  ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.17) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_c^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{2/3}}{\exp[(E - E_F)/k_B T] + 1} dE \quad (2.18)$$

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

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{k_B T}\right] \quad (2.19)$$

เมื่อ 
$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_c^* k_B T}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.20)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{k_B T}\right] \quad (2.21)$$

โดย 
$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

$N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K โหลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.21) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{k_B T}\right] \quad (2.23)$$

และ

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2k_B T}\right] \quad (2.24)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_c^* m_h^*}{m^2}\right)^{3/4} \exp\left[-\frac{E_g}{2k_B T}\right] \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

### 2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K นั่นคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{k_B T}\right] \quad (2.26)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{k_B T}\right] \quad (2.27)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานไม่อยู่ในสภาพซ้อนสถานะจะยังคงมีความสัมพันธ์

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

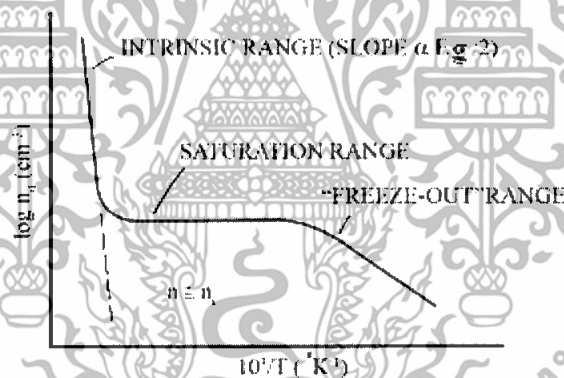
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.29)$$

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

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (Fahrenbruch A. L., 1983) คือ



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของสิ่งเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.29) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.28) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.31)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.32)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.31) และ (2.32) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.33)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มากจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.31) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.34)$$

## 2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ ( $n_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล ( $p$ ) และอะตอมผู้รับ ( $n_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.29) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.35)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{k_B T} \right\}} \right] \quad (2.36)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ แฟกเตอร์สภาพซ้อนสถานะ (degeneracy factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.26), (2.35) และ (2.36) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.37) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{k_B T}\right) \quad (2.38)$$

$n$  อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $E_d \gg k_B T$  และ  $N'_c$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.39) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (Binomial series) จะได้

$$n = -\frac{(N_d + N'_c)}{2} + \frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_d + N'_c} + \dots$$

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_d + N'_c} \quad (2.40)$$

ถ้า  $N_a \gg N'_c$  สมการที่ (2.40) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_c \exp\left[-\frac{E_d}{k_B T}\right] \quad (2.41)$$

ถ้า  $N_a$  มีค่าน้อยมากนั่นคือ  $N_d \gg N'_c \gg N_a$  จะทำให้สมการที่ (2.37) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.42)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2k_B T}\right] \quad (2.43)$$

จะเห็นว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นไปตามสมการที่ (2.42) เมื่ออุณหภูมิตำลงจนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.43) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

**2.5.2 สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่อง (งามนิทย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971 ; งามนิทย์ และคณะ, 2545; Runyan W. R. , 1975; สมฤทธิ์, 2538; Van der Pauw L. J., 1958 )**

ในผลึกอุดมคติหรือผลึกสมบูรณ์ (ideal or perfection crystal) การเคลื่อนที่ของพาหะเป็นไปอย่างอิสระ สนามไฟฟ้าภายนอก ( $\epsilon$ ) จะทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  โดยมีความเร่งคงที่ นั่นคือ

$$m_e \frac{dv}{dt} = e\epsilon \quad (2.44)$$

แต่สำหรับผลึกจริงหรือผลึกไม่สมบูรณ์จะเป็นผลึกที่ประกอบด้วยข้อบกพร่องผลึกแบบต่างๆ ได้แก่ โครงผลึกที่มีอะตอมของสารเจือปน โครงผลึกที่ผิดรูปหรือบิดเบี้ยวไปและโฟนอน เป็นต้น การที่พาหะชนเข้ากับสิ่งเหล่านี้ย่อมทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของพาหะถูกจำกัดที่สภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อช่วงเวลาผ่านไปนานมากจนประมาณได้ว่าเข้าสู่อนันต์ ( $t \rightarrow \infty$ ) หรือที่เรียกว่าระบบดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) ดังนั้นจะได้ค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ คือ

$$\langle v \rangle = e\epsilon \frac{\langle \tau \rangle}{m_e^*} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง (mean free time) ซึ่งเป็นเวลาที่พาหะเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะมีการกระเจิงกัน โดยที่

$$\tau = \frac{l}{v} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $l$  คือ ระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง (mean free path) ซึ่งเป็นระยะทางที่พาหะเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะมีการกระเจิงกัน

$v$  คือ ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ

นิยามความหนาแน่นของกระแส

$$J = ne\langle v \rangle \quad (2.47)$$

จะได้

$$J = \frac{ne^2\langle \tau \rangle}{m_e^*} \epsilon \quad (2.48)$$

นี่คือกฎของโอห์มซึ่งนิยามโดย

$$J = \sigma \epsilon \quad (2.49)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity)

นิยามสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity:  $\rho$ ) ว่าเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจะได้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e^*}{ne^2\langle \tau \rangle} \quad (2.50)$$

พิจารณาสมการที่ (2.45) ค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อน  $\langle v \rangle$  เป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้านั้นคือ

$$\langle v \rangle = \mu \epsilon \quad (2.51)$$

และ

$$\mu = \frac{e\langle \tau \rangle}{m_e^*} \quad (2.52)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สภาพคล่องของพาหะ (mobility)

โดยนิยามว่าเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนของพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าขนาดหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  ซึ่งเป็นจริงเมื่อสนามไฟฟ้าที่มาจากภายนอกมีค่าไม่มาก ( $E < 1 \text{ kV/cm}$ )

สภาพคล่องของพาหะ ( $\mu$ ) ช่วงเวลาเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง  $\langle \tau \rangle$  และระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิง ( $l$ ) ขึ้นกับกลไกที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการที่หนึ่ง เป็นกรณีที่พาหะมีการกระเจิงกับโฟนอน (phonon scattering) ซึ่งมักเด่นชัดที่อุณหภูมิสูง และประการที่สอง เป็นกรณีที่พาหะกระเจิงกับรูปทรงทางเรขาคณิตของสาร (geometric scattering) ซึ่งมักเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

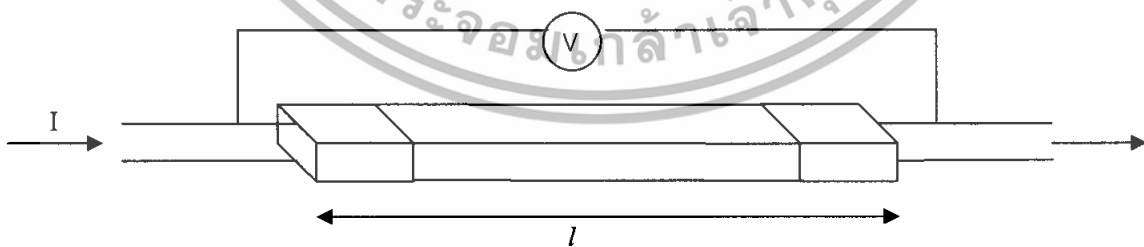
ต่ำ ได้แก่ ขนาดและรูปร่างขอบเขตของผลึก การมีอะตอมของธาตุไอโซโทปในผลึก การมีข้อบกพร่องผลึกแบบต่างๆ ในผลึกไม่สมบูรณ์ การกระเจิงกับโฮลหรืออิเล็กตรอนด้วยตัวเอง และการกระเจิงกับอะตอมของสารเจือปน เป็นต้น

### 2.5.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971 ; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Runyan W. R. , 1975; สมฤทธิ, 2538; Van der Pauw L. J., 1958 )

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนตัวของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการ ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

#### 2.5.3.1 วิธีวัดโดยตรง (direct method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า มักจะวัดความต้านทานก่อนซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง หมายถึงการวัดค่าความต้านทานรวมของสาร แล้วถึงมาคิดความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสารที่ต้องการวัด วิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัด และความยาวให้ได้แน่นอน เช่น ทรงกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมกัน ซึ่งแสดงให้เห็น ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดโดยตรง

จากค่าที่ทราบ คือกระแส และศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาค่า ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด  $A$  บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \rho l / A \quad (2.53)$$

$$\rho = R(A/l) = (V/I)(A/l) \quad (2.54)$$

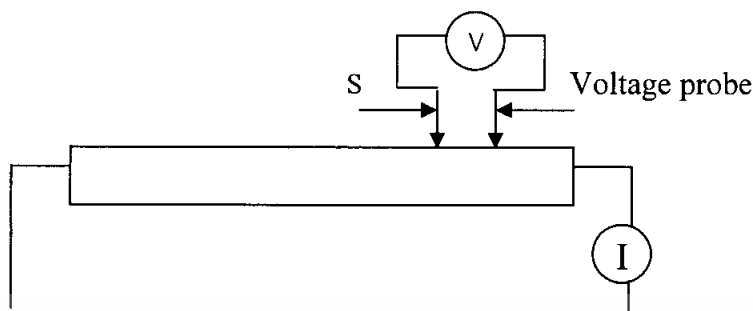
จะเห็นว่าวิธีเป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วยกัน

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้า และออกนั้นเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ใช่นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี มักจะมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริง ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัด และความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้ว จะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าค่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์เพราะที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ดีนั้นจะตรวจสอบได้ยากกว่า จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง ๆ ถ้าทำเช่นนี้ค่าผิดพลาดก็จะน้อยมาก

### 2.5.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe method)

การวัดด้วยวิธีนี้ มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัดโดยตรง แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.15 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.15 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

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

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วหลาย ๆ ตำแหน่งนี้ สามารถแยกความต้านทานจำเพาะสภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

**สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้นหรือสี่ขั้วเชิงเส้น**

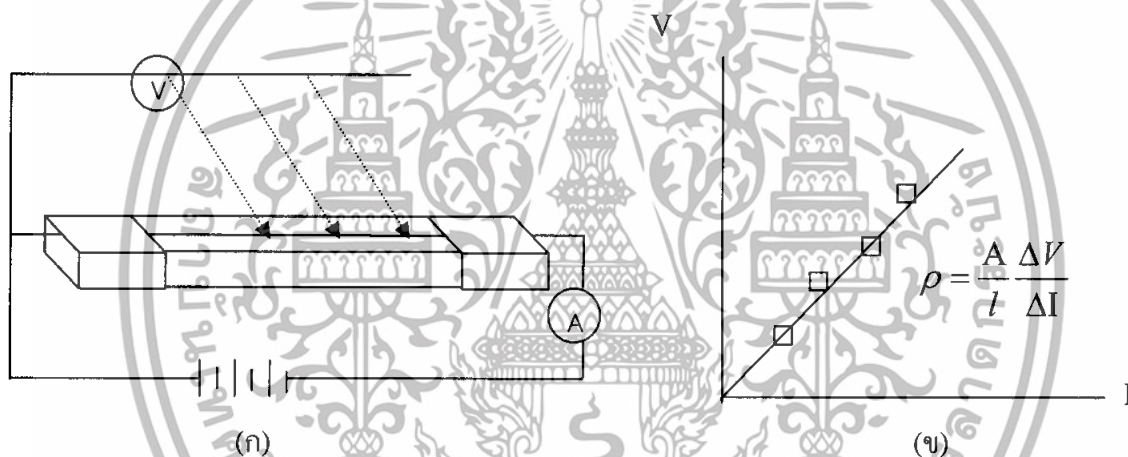
- วัดศักย์ที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่าง และห่างจาก บริเวณกระแสเข้า - ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์บนสารกึ่งตัวนำนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็ง และนำไฟฟ้าได้ดี เช่น แพลทินัม ทังสแตน เงิน เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่างจะต้องทราบระนาบ หรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่างว่า กำลังวัดอยู่บนระนาบใด หรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องเป็น ผลึกสัมบูรณ์มีเกรนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรนที่ผิว และมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งก้อนผลึก

### ข้อแก้ไข

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



รูปที่ 2.16 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัดโดยวิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้า

#### 2.5.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method)

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น เป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรมวิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้วซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วมีปัญหาอยู่ 2 จุด และ 4 จุด คล้าย ๆ กัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่าง ๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้า - ออก ตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนเลสที่มีลักษณะเส้นเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกันจัดให้เท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะพอ จะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริง ๆ แล้วจะใช้การหาศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการพัวซอง ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาค่านำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปแล้วจะหาได้จากกระแสที่เข้าไปในสารตัวอย่าง และวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานเฉพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ

- 1) ขั้วทั้งสองต้องมีลักษณะ มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็น โลหะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย
- 2) สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้งสองที่อยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่ากระแสกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (hemisphere) โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิต เมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่าง จะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใด ๆ ได้

$$V = K/r \quad (2.55)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะใด ๆ ที่จะหาศักย์ที่จุดที่ให้กระแส และ

$K$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของกระแสที่ฉีดเข้าไป และรูปร่างของสารตัวอย่าง

#### 2.5.3.4 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น

ถึงแม้ว่าการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มาตรฐาน มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ซึ่งพอจะสรุปเป็นข้อย่อ ๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้ รวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่าง ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่วางหัววัดได้ และรูปทรงของสารตัวอย่างควรมีรูปทรงทางเรขาคณิต เพราะความยาว และพื้นที่หน้าตัดจะนำมาใช้คำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

### 2. การรั่วไหลของกระแส

การรั่วไหลอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบ และบริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจจะเกิดจากความผิดปกติทางผลึกภายในอีกด้วย

### 3. อุณหภูมิ

- สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะ ทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะมีผลกระทบน้อยกว่าฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีผลควรทำการวัดหลาย ๆ จุด และจะต้องใช้ ความระมัดระวัง เพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งส่งผลกระทบไปถึงปรากฏการณ์ภายในของสารตัวอย่าง
- ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะสั้นๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมมติขั้วสม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่ และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไขด้วยวิธีตรงที่ขั้วหนึ่ง และอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะ ๆ โดยมีมาตรฐานบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

### 4. แสง

ขณะทำการวัดควรมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้น ให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้นได้ส่งผลให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกัน แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้สารตัวอย่าง ทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

## 5. ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้จะหลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อย สำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะแต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นจึงพยายามวัดในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

## 6. ผิดสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

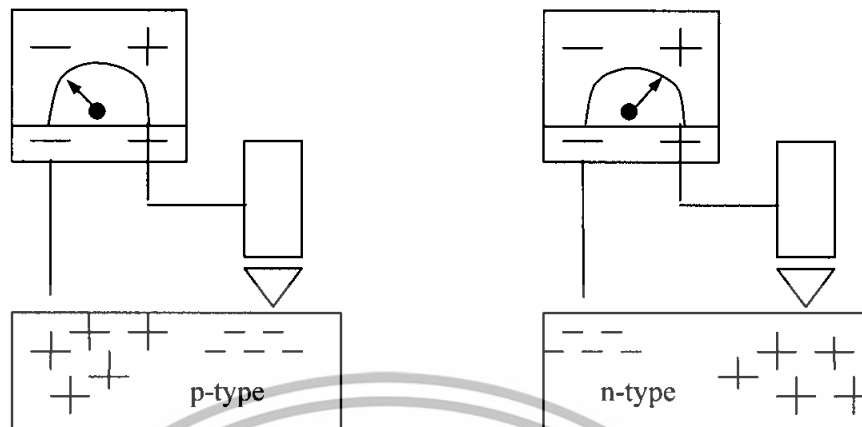
ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้น กับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักจะมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสทำให้เกิดข้อผิดพลาด การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบ และเลือกชนิดของโลหะที่ใช้มาเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อนค่าที่จะเป็นที่ยอมรับ การทดสอบความต้านทานขั้วสัมผัส มักจะพิจารณา ค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส

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

### 2.5.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยใช้วิธีขั้วความร้อน (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; ลูตินัย, 2546)

วิธีขั้วความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวก และรวดเร็วในการตรวจสอบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือ จี๊หวัดแรงบัลดกิริลงไปตรงบริเวณที่ปรากฏเป็นรอยค่างของผิวหน้าฟิล์มบางรอยค่างนี้เกิดจากบริเวณที่กระจกเลียบเข้ากับแท่งเทฟลอน ดังนั้นฟิล์มจึงเคลือบไม่ติด โยงสายไฟจากหัวแร้งเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกฟิล์มบางนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็มโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบ ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

### 2.5.5 ปฏิกิริยาฮอลล์ (Hall effect) (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; สมฤทธิ, 2538; van der Pauw L. J., 1958)

จากสมการที่ (2.50) และ (2.52) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของ สภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.57)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

$\mu_e$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน

$\mu_p$  คือ สภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.58) และ (2.59) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

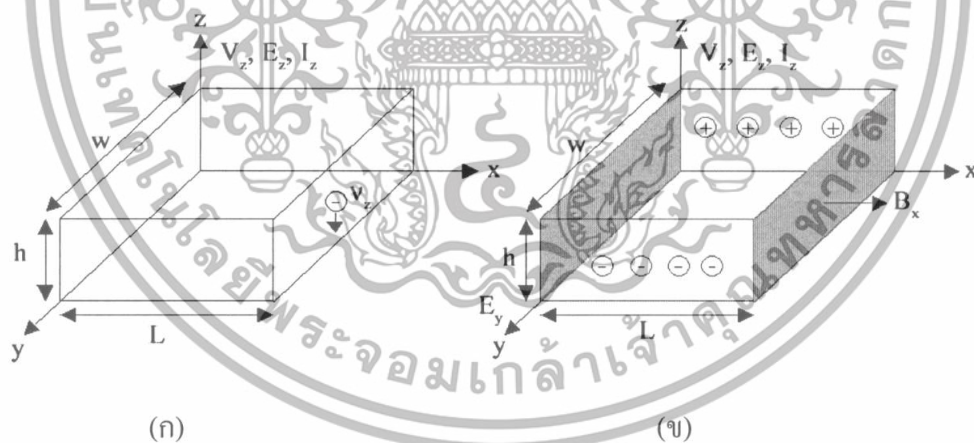
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.58)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.59)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธีโดยวิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย Edwin Herbert Hall

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่เป็นรูปทรงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $z$  หรืออาจมองว่ามีกลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทิศ  $z$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_z$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $z$  คือ  $I_z$  ดังสมการที่ (2.60)



รูปที่ 2.18 ปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศ  $x$

ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศ  $x$

$$I_z = qnwhv_z \quad (2.60)$$

จากกฎของโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.61) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.62)$$

จากรูปที่ 2.18

$$A = w.h \quad (2.63)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_z$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.61), (2.62) และ (2.63)

$$\rho = \frac{V_z \cdot A}{I_z \cdot L} = \frac{V_z \cdot wh}{I_z \cdot l} \quad (2.64)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ( $B_x$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $x$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $y$  สะสมในบริเวณขอบด้านนอก (+ $y$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์ขึ้นที่ขอบด้านใน (- $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall voltage:  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_z \times B_x) + E_y \quad (2.65)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากัน จะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศ  $z$  ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_z B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z}{wh} \cdot B_x \quad (2.66)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.66) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_z \cdot B_x \quad ; \quad J_z = \frac{I_z}{wh} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ 
$$R_H = \frac{E_y}{J_z B_x} = \frac{1}{qn} \quad (2.68)$$

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB_x}{wh} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB_x}{h} \end{aligned} \quad (2.69)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{h}{B} \quad (2.70)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{I}{qR_H} = \frac{I}{V_H} \cdot \frac{B_x}{qh} \quad (2.71)$$

โดยทั่วไปกลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2.72)

$$\tau = \tau(E) \quad (2.72)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.73)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.74)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยามค่า  $r$  ได้จากสมการที่ (2.75)

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.75)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึก หรือการกระเจิงเนื่องจากสารเจือปนที่มีการไอออนไนซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.76)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 G ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.56) และ (2.73) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} = r\mu \quad (2.77)$$

หรือจากสมการที่ (2.70)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{h}{B} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.78)$$

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

ซึ่งจากการทดลองจะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ( $I_0$ ) จากนั้นก็วัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นขณะที่ยังไม่จ่ายสนามแม่เหล็ก ( $V_0$ ) ต่อมาทำการจ่ายสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ แล้ว

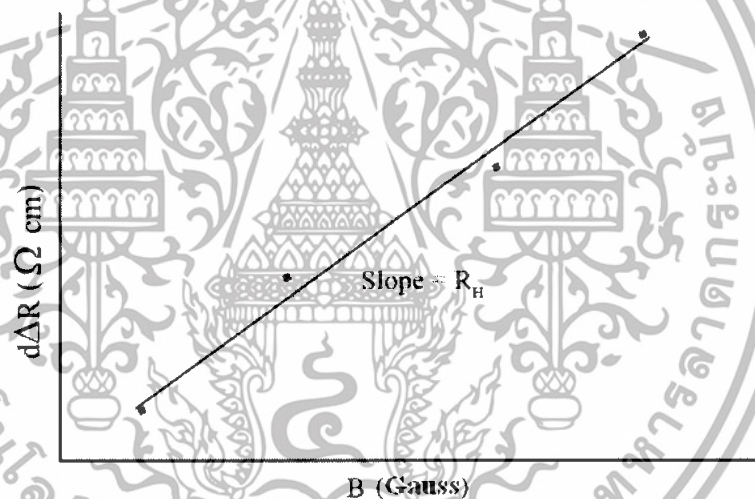
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดค่าแรงดันที่เกิดขึ้น นำค่าที่ได้มาหาค่าความต้านทานที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ (R) และนำค่าไปเขียนกราฟระหว่างค่า  $d\Delta R$  กับ B ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) จากความสัมพันธ์

$$R_H B = 10^8 d\Delta R \quad (2.79)$$

หรือ  $R_H =$  |ความชันของกราฟ| หน่วยเป็น  $\text{cm}^3/\text{C}$

เมื่อ d	คือ	ความหนาของฟิล์มบาง มีหน่วยเป็น cm
B	คือ	ค่าสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Gauss
$\Delta R$	คือ	ผลต่างของความต้านทานขณะจ่ายสนามแม่เหล็ก (R) กับความต้านทานขณะที่ยังไม่จ่ายสนามแม่เหล็ก ( $R_0$ ) มีหน่วยเป็น ohms



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d\Delta R$  กับ B เพื่อใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์

### 2.5.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (งามนิตย์ และคณะ, 2549; งามนิตย์ และคณะ, 2545; สมฤทธิ, 2538; van der Pauw L. J., 1958)

เทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นแบนใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ 1, 2, 3 และ 4 กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว 1, 3 และวัดความต่างศักย์จากขั้ว 2, 4

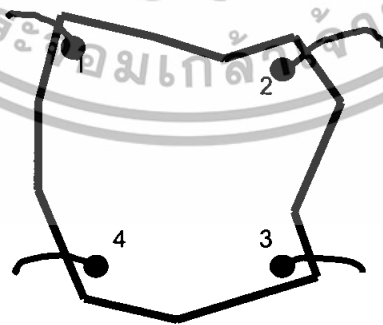
นิยาม

$$R_{1324} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (2.80)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \frac{d}{B} \Delta R_{1324} \quad (2.81)$$

เมื่อ  $\Delta R_{1324}$  คือ ผลต่างระหว่างค่า  $R_{1324}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก  
 $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง  
 $B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.20 สารตัวอย่างแผ่นบางรูปทรงใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพคล่องขอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \cdot \Delta R_{1324} \quad (2.82)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางอิสระเฉลี่ย (l) ได้จากสมการที่ (2.83) (Thangaraju B., 2002; Joseph Prince J. และคณะ, 2002)

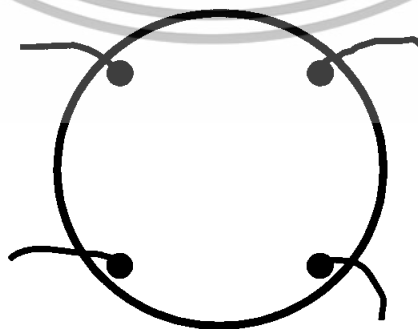
$$l = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.83)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

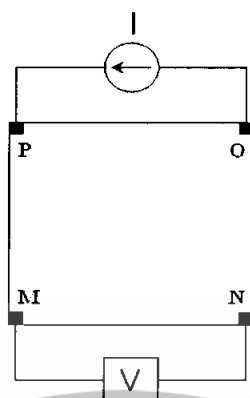
### 2.5.7 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Elangovan E. และคณะ, 2003; งามนิศย์ และคณะ, 2549; งามนิศย์ และ คณะ, 2545; สมฤทธิ, 2538; van der Pauw L. J., 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.84)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.84)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.85)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.85)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.86)$$

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

โดย

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.87)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.88)$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.8 กลไกการกระเจิงพาหะ (Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Kodigala Subba Ramaiah\* และคณะ, 2006)

### 2.5.8.1 การกระเจิงของแลตทิซหรือการกระเจิงแบบอะคูสติก

สภาพคล่องพาหะของการกระเจิงของแลตทิซที่ขึ้นกับอุณหภูมิสามารถหาได้จาก

$$\mu_L = \frac{(8\pi)^{1/2} e \hbar^4 C_{ii}}{3E_i^2 (m^*)^{5/2} (k_B T)^{3/2}} \quad (2.89)$$

เมื่อ	$\hbar$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ $6.625 \times 10^{-34}$ J.S
	$m^*$	คือ	ค่ามวลยังผลของอิเล็กตรอน โดยมีค่าเท่ากับ $0.275m_0$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าที่ได้มาจากการวิจัยอื่นซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง $0.4m_0$
	$m_0$	คือ	ค่ามวลนิ่งของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $9.1 \times 10^{-31}$ kg
	$k_B$	คือ	ค่าคงที่ของโบลตซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23}$ J/K
	$\beta_S$	คือ	ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเชิงปริมาตร (elastic bulk modulus) มีค่าเท่ากับ $\beta_S = \frac{(C_{11} + 2C_{12})}{3}$
	$C_{ii}$	คือ	ค่าคงตัวยืดหยุ่นสำหรับกรณีคลื่นตามยาวอะคูสติก (elastic constants for longitudinal acoustic wave) โดยค่าของ $C_{11}, C_{12}, C_{44}$ ไม่สามารถหาค่าได้

โดยทั่วไปค่าของ  $\beta_S$  จะมีค่าเหมือนกับค่าของ  $C_{ii}$  โดยสามารถแทนค่า  $\beta_S$  ด้วย  $\theta_D$  ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta_S$  กับ  $\theta_D$  ได้ดังสมการ

$$\theta_D = \frac{\hbar}{k_B} v_0 \left( 6\pi^2 \frac{N_A}{V} \right)^{1/3} ; \frac{\beta_S}{\rho} = v_0 \quad (2.90)$$

เมื่อ	$\theta_D$	คือ	อุณหภูมิเดอว์บายน์ (Debye Temperature)
	$N_A$	คือ	เลขอโวกาโดร มีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23}$ /mol
	$V$	คือ	ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (unit cell)
	$\rho$	คือ	ค่าความหนาแน่นของวัสดุ
	$v_0$	คือ	ค่าความเร็วเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.8.2 การกระเจิงแบบโพลาร์หรือการกระเจิงแบบออปติคอลล

สามารถอธิบายค่าสภาพคล่องพาหะการกระเจิงแบบโพลาร์ได้จาก

$$\mu_{Pol} = \frac{8}{3} \frac{\hbar^2}{(2\pi k_B \theta_D)^{1/2} (m^*)^{3/2} e} \left( \frac{\epsilon_0 \epsilon_\infty}{\epsilon_0 - \epsilon_\infty} \right) \frac{1}{z^{1/2}} \chi(z) (e^z - 1) \quad (2.91)$$

โดยที่  $\theta_D$  คือ อุณหภูมิเดบาย์สำหรับโฟนอนประเภทคลื่นตามยาว  
ออปติคอลล (longitudinal optical phonons)

$$z = \frac{\theta_D}{T} ; \quad \chi(z) = 1, \quad z \ll 1 ; \quad \chi(z) = 3(\pi z)^{1/2}, \quad z \gg 1$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ  
 $\epsilon_\infty$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง

### 2.5.8.3 การกระเจิงของไอออนสำหรับสารกึ่งตัวนำแบบนอติเจนเนอเรต

สามารถอธิบายค่าสภาพคล่องพาหะการกระเจิงของไอออนที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้จากการ  
ขยายตัวของ Conwell และ Weisskopf

$$\mu_{IN} = \frac{64\pi^{1/2} \epsilon^2 (2k_B T)^{3/2}}{N_i z^2 e^3 (m^*)^{1/2}} \left[ \ln \left\{ 1 + \left( \frac{12\pi \epsilon k_B T}{z e^2 N^{1/3}} \right)^2 \right\} \right]^{-1} \quad (2.92)$$

เมื่อ  $\mu_{IN}$  คือ สภาพคล่องพาหะการกระเจิงของไอออน  
 $N_i$  คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $N + 2N_A$   
 $N$  คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสุทธิ มีค่าเท่ากับ  $N_D - N_A$   
 $N_D$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้  
 $N_A$  คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ

### 2.5.8.4 สารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออะตอมของสารเจืออย่างหนัก

สภาพคล่องพาหะที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออะตอมของสารเจือ  
(heavy doped) อย่างหนักแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{ID} = \left( \frac{e}{m^* v_F} \right) (\sum N_i Q_i)^{-1} \quad (2.93)$$

เมื่อ  $Q_i$  คือ โอกาสการกระเจิง (scattering cross-section) ซึ่งได้ค่าจากสมการ

$$Q_i = \left[ \frac{2z^2 e^4 m^* g(x)}{3(3\pi^5)^{1/3} \hbar^4 (4\pi\epsilon_0 \epsilon)^2} \right] N_i^{-4/3}$$

โดย  $g(x) = \ln\left(1 + \frac{4}{x}\right) - \left(1 + \frac{x}{4}\right)^{-1}$

$$x = \left[ \frac{4e^2 m^*}{(3\pi^5)^{1/3} \hbar^2 (4\pi\epsilon_0 \epsilon) N^{1/3}} \right]$$

เมื่อ  $v_F$  คือ ความเร็วของเฟอร์มิอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $\hbar k_F / m^*$

$k_F$  คือ เลขคลื่นอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $(3\pi^2 N)^{1/3}$

ดังนั้นจะได้ค่าสภาพคล่องพาหะเป็น

$$\mu_{ID} = \frac{24\pi^3 \hbar^3 (\epsilon_0 \epsilon)^2 N}{z^2 e^3 g(x) N_i m^{*2}} \quad (2.94)$$

ในกรณีทั่วไปค่าสภาพคล่องพาหะจะขึ้นกับพารามิเตอร์หลายตัวเช่น ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ คำนวณยังผล เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของสภาพคล่องพาหะในกรณีของสารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออะตอมของสารเจืออย่างหนัก จะสรุปได้ดังสมการ

$$\mu_{ID} = \frac{e}{m^*} \tau_1 \quad (2.95)$$

เมื่อ  $\tau_1$  คือ ช่วงเวลาผ่อนคลาย เท่ากับ  $\tau_1 = \frac{4(2E/E_1)^2}{\pi N_i^{1/3} v 2 \ln[1 + (2E/E_1)^2]}$

$v$  คือ ค่าความเร็ว เท่ากับ  $v = \sqrt{3k_B T / m^*}$  ,  $\frac{2E}{E_1} = \frac{(3/\pi)^{2/3} \epsilon \hbar^2 N^{1/3}}{8m^* e^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.8.5 การกระเจิงของอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral impurity atoms)

ที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าสภาพคล่องพาหะ ในกรณีที่มีการกระเจิงของอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จะเป็นไปตามสมการ

$$\mu_N = \frac{m^* e^3}{20 \epsilon_0 \epsilon \hbar^3 n_N} \quad (2.96)$$

เมื่อ  $n_N$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้า  
 $\mu_N$  คือ ค่าสภาพคล่องของอะตอมของสารเจือที่เป็นกลางทางไฟฟ้า

### 2.5.8.6 การกระเจิงบริเวณขอบของเกรน

ขอบเขตของเกรน (grain boundary) จะขึ้นกับว่าถ้าเกรนมีขนาดเล็กและมีความไม่สมบูรณ์ในการทำพันธะกันระหว่างอะตอม ซึ่งบริเวณขอบของเกรนจะทำหน้าที่จับพาหะอิสระส่งผลให้ความนำไฟฟ้ามีค่าลดลง ความหนาแน่นพาหะบริเวณขอบของเกรนจะมีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งบริเวณขอบของเกรนนี้จะเกิดข้อบกพร่องขึ้นหรือเกิดเป็นศูนย์กลางการดักจับพาหะ มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นพาหะอิสระและค่าสภาพคล่องพาหะมีค่าลดลง

ค่าสภาพคล่องพาหะในกรณีที่กระเจิงบริเวณขอบของเกรนแสดงได้ดังสมการ

$$\mu_G = l e \left( \frac{1}{2\pi m^* k_B T} \right)^{1/2} \exp \left( \frac{-E_a}{k_B T} \right) \quad (2.97)$$

เมื่อ  $E_a$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้น  
 $l$  คือ ขนาดของเกรนคิบูกซ์ไฟด์

ซึ่งจะได้ค่าสภาพคล่องพาหะรวมเป็น

$$\frac{1}{\mu} \approx \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_{Pol}} + \frac{1}{\mu_{IN}} + \frac{1}{\mu_N} + \frac{1}{\mu_G} \quad (2.98)$$

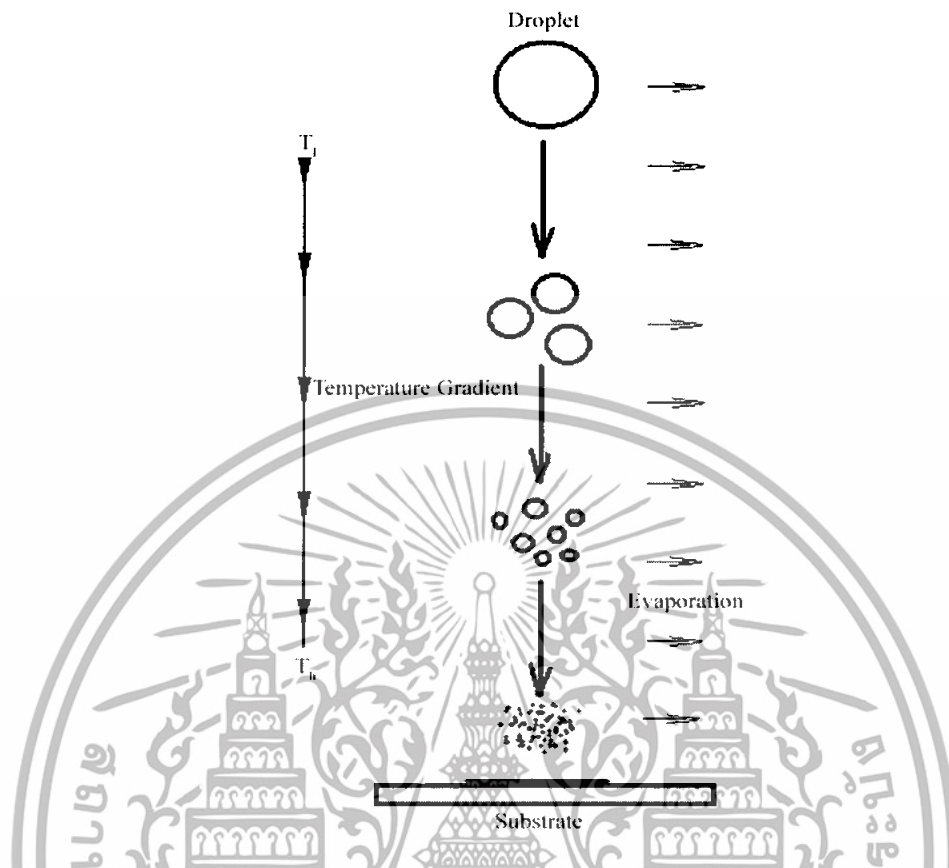
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 กระบวนการการเกิดฟิล์มบาง (งามนิตย์ และคณะ, 2549; อุปลักษณ์, 2548; งามนิตย์ และคณะ, 2545)

เมื่อสารละลายถูกทำให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กโดยวิธีการใช้อัลตราโซนิกช่วยหรือวิธีการใช้ลมอัดก็ตามนั้น เมื่อหยดของสารละลายเข้าใกล้ฐานรองรับมากขึ้น อุณหภูมิบริเวณใกล้กับฐานรองรับก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีการให้ความร้อนกับฐานรองรับ ซึ่งผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ขนาดของหยดสารละลายมีขนาดเล็กลงด้วย เนื่องจากเมื่อหยดของสารละลายได้รับความร้อนจะทำให้สารละลายบางส่วนมีการระเหยออกไปทำให้หยดของสารละลายมีขนาดเล็กลง ดังที่แสดงรูปที่ 2.23 (Hou X. และคณะ, 2004) ซึ่งขนาดของหยดของสารละลายนั้นสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.99)

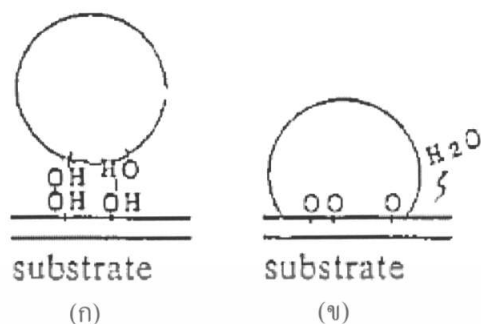
$$D_p^2 = D_{p,0}^2 - 8t \frac{C_A D_{AB}}{C_p} \ln \left[ \frac{1 - x_{A\infty}}{1 - x_{As}} \right] \quad (2.99)$$

- เมื่อ  $D_{p,0}$  คือ ขนาดของหยดสารละลายที่เวลาเริ่มต้น ( $t=0$ )
- $C_A$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย A ในสถานะที่เป็นไอ
- $C_p$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย A ในสถานะที่เป็นของเหลว
- $D_{AB}$  คือ ความสามารถในการกระจายของไอของสารละลาย A ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซ B
- $x_{A\infty}$  คือ เศษส่วนโมล (mole fractions) ของสารละลาย A ที่ระยะไกลจากหยดของสารละลาย
- $x_{AS}$  คือ เศษส่วนโมลของสารละลาย A ที่พื้นผิวหยดของสารละลาย
- $t$  คือ ระยะเวลาที่หยดของสารละลายตกลงบนฐานรองรับ



รูปที่ 2.23 แสดงการลดลงของขนาดของหยดสารละลายตามระยะทางจากฐานรองรับ

เมื่อหยดของสารละลายตกลงบนพื้นผิวของฐานรองรับ หยดของสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำ (dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.24(ก) (Okuya M. และคณะ, 2004) และจะเกาะกับแผ่นของฐานรองรับดังรูปที่ 2.24(ข) (Okuya M. และคณะ, 2004) เมื่อปริมาณของหยดสารละลายที่จับอยู่บนพื้นผิวของฐานรองรับมีปริมาณที่มากพอ อีกทั้งยังได้รับความร้อนจากแผ่นฐานรองรับทำให้แต่ละหยดของสารละลายที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของฐานรองรับนั้นเกิดการเชื่อมต่อกัน และเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นเนื้อฟิล์มในที่สุดซึ่งกระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.25 (Tsukuma K และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.24 แบบจำลองการเกิดฟิล์มบางบนผิวของแผ่นฐานรองรับ

ก. การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียน้ำ

ข. การเกิดฟิล์มบางบนแผ่นฐานรองรับ



รูปที่ 2.25 แสดงการรวมตัวของฟิล์มบางที่เกิดจากวิธีการพ่นละอองสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.7 ทฤษฎีของดรูด (Drude's theory) (งามนิตย์ และคณะ, 2549; Kittel C., 1971; งามนิตย์ และคณะ, 2545; Shanthi S. และคณะ, 1999; Elangovan E. และคณะ, 2003)**

จากการใช้ทฤษฎีการประมาณของกลุ่มก๊าซอิเล็กตรอนอิสระเฟอร์มี (free electron Fermi gas approximation) พบว่าค่าความสัมพันธ์ของ ไดอิเล็กตริกฟังก์ชันกับค่าความถี่ของพลังงานโฟตอนเป็นดังสมการที่ (2.100)

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.100)$$

เมื่อ  $\omega_p$  คือ ค่าความถี่ของพลาสมาของสารแต่ละชนิด  
 $\omega$  คือ ค่าความถี่ของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

โดยที่ 
$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{2\pi c}{\lambda_p} \quad (2.101)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (2.102)$$

เมื่อ  $\lambda_p$  คือ ค่าความยาวคลื่นของพลาสมา  
 $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอน  
 $f_p$  คือ ค่าความถี่ของพลาสมา  
 $f$  คือ ค่าความถี่ของพลังงานโฟตอน  
 $c$  คือ ค่าความเร็วแสง

สามารถคำนวณหาค่าความถี่ของพลาสมาของสารแต่ละชนิดได้จากสมการที่ (2.103)

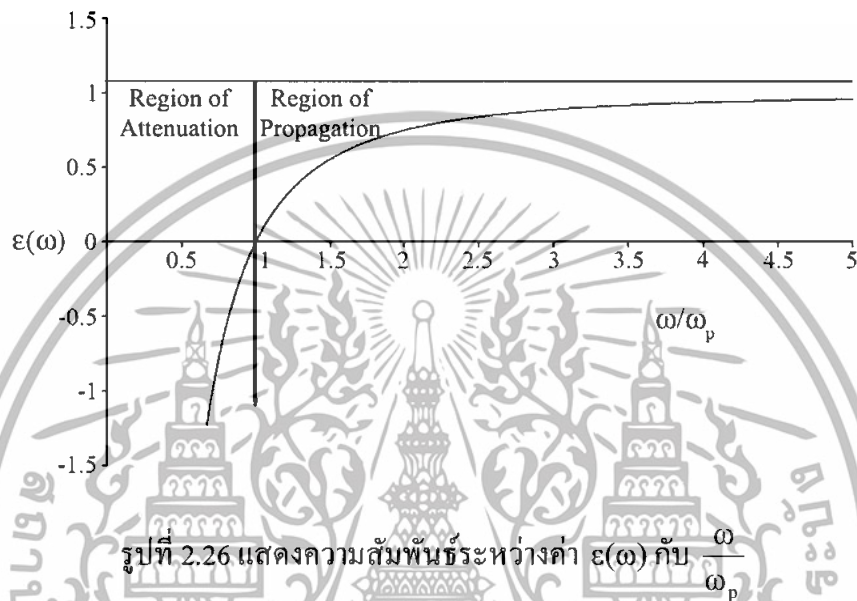
$$\omega_p = \left( \frac{ne^2}{\epsilon_0 \epsilon_\infty m^*} \right)^{1/2} \quad (2.103)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ โดยมีค่าเท่ากับ 1  
 $\epsilon_\infty$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง มีค่าเท่ากับ 10  
 $m^*$  คือ ค่ามวลขั้วผลของอิเล็กตรอนภายในสารแต่ละชนิดของฟิล์มบาง  
 ดิบกออกไซด์ จะมีค่าเท่ากับ 0.19  $m_e$  ถึง 0.33  $m_e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$m_e$  คือ มวลนิ่ง (rest mass) ของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $9.1 \times 10^{-31}$  kg

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง ค่า  $\frac{\omega}{\omega_p}$  กับ ค่า  $\epsilon(\omega)$  จะได้กราฟดังรูปที่ 2.26 ทำให้ทราบความยาวคลื่นของพลาสมาได้



รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\epsilon(\omega)$  กับ  $\frac{\omega}{\omega_p}$

เมื่อ  $\omega > \omega_p$  พลังงานโฟตอนที่เป็นคลื่นตามขวาง (photon transverse mode) สามารถส่งผ่านตัวกลางได้ ตัวกลางมีความสามารถโพลาไรซ์ได้ดี ( $\epsilon(\omega) > 0$ )

เมื่อ  $\omega = \omega_p$  เป็นจุดที่เริ่มไม่ยอมให้พลังงานโฟตอนที่เป็นคลื่นตามขวางส่งผ่านตัวกลางได้ ( $\epsilon(\omega) = 0$ )

เมื่อ  $\omega < \omega_p$  พลังงานโฟตอนที่เป็นคลื่นตามขวางไม่สามารถส่งผ่านตัวกลางได้ ตัวกลางไม่มีความสามารถในการโพลาไรซ์ หรือเป็นกรณีที่พลังงานโฟตอนที่เป็นคลื่นตามขวางถูกลดทอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในตัวกลางได้ หรือพลังงานโฟตอนที่เป็นคลื่นตามขวางนี้ถูกสะท้อนกลับหมด (totally reflection photon transverse mode) ( $\epsilon(\omega) < 0$ )

## บทที่ 3

### การดำเนินงานทดลอง

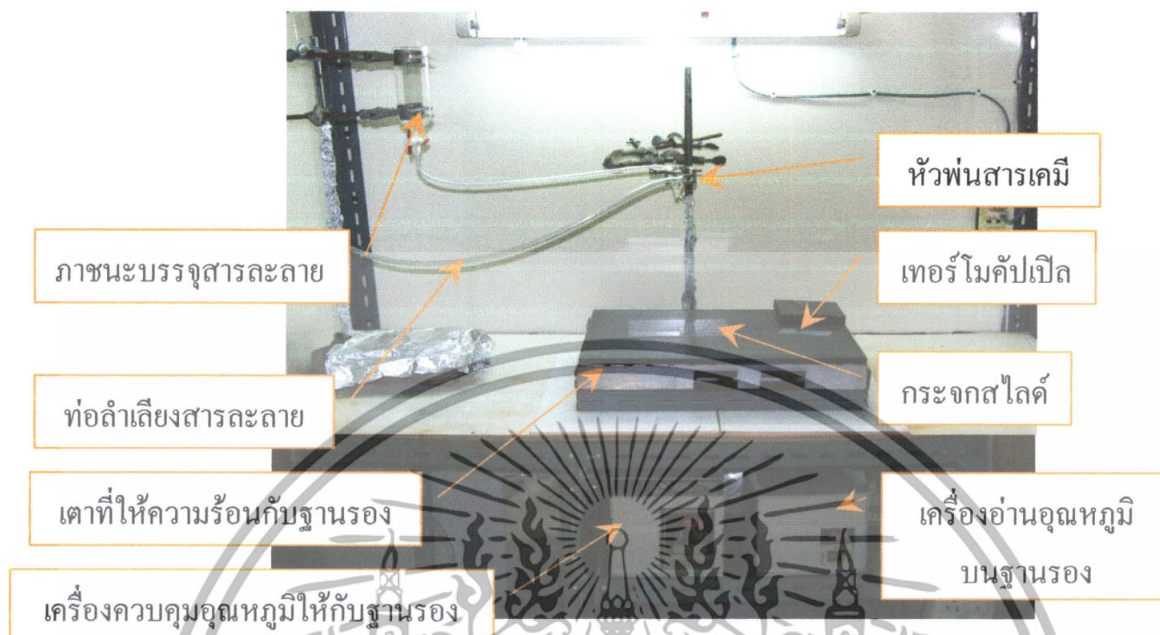
ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยได้กล่าวถึงอุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี

- แผ่นกระจกสไลด์ 25x75 มิลลิเมตร
- บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
- เตาให้ความร้อนกำลังสูงสุด 6000 วัตต์
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- หัวพ่นละอองสารเคมี
- เครื่องชั่งดิจิตอล
- แก๊สไนโตรเจน
- สารตั้งต้น ประกอบด้วย
  1. n , n-dimethyl thiourea ( $C_3H_8N_2S$ )
  2. Isopropyl alcohol
  3.  $SnCl_2 + H_2O$
  4. น้ำปลอดประจุ (Deionizerd water : DI water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี

### 3.1.2 การศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการ ประกอบด้วย

3.1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คัลิฟิเพรทโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_K\alpha$  เท่ากับ  $1.5406 \text{ \AA}$

3.1.2.2 ศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400

3.1.2.3 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ โดยทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101PC

### 3.1.2.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

- แหล่งจ่ายไปกระแสตรงปรับค่าได้ ยี่ห้อ Dolphin Electronic
- อิเล็กโตรมิเตอร์
- มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Digicon รุ่น DM-810A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.5 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- เครื่องวัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
- เตาให้ความร้อน
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

### 3.1.2.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

- เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัด ยี่ห้อ Phywe
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงค่าสูง ยี่ห้อ Electronic Measurement Inc.
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ ยี่ห้อ Dolphin Electronic
- มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Digicon รุ่น DM-810A
- มัลติมิเตอร์ รุ่น 8842A ของบริษัท Fluke
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

## 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับ (งามนิคย์ และคณะ, 2549; อุปลักษณ์, 2548; งามนิคย์ และคณะ 2545)

แผ่นฐานรองรับที่แผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง SnS โดยวิธีการพ่นละอองเคมีเป็น มีความกว้างและยาว 25 และ 75 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนสั้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลสั้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยกรด HF สั้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอลอดประจุสั้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 รอบ และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

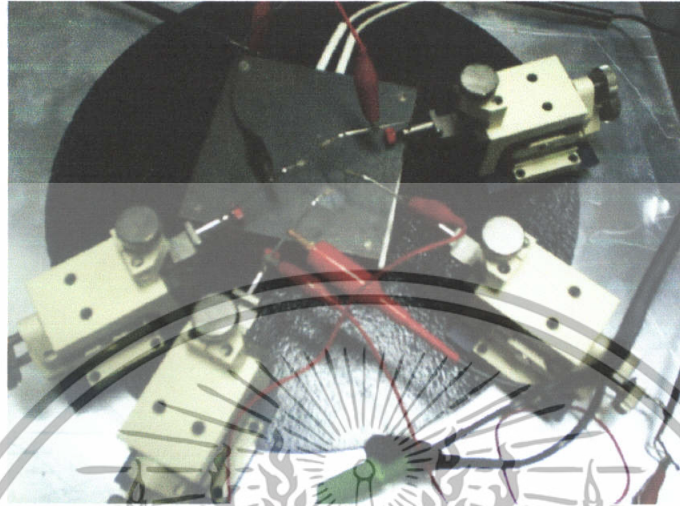
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยการพ่นละอองสารเคมี (งามนิทย์ และคณะ, 2549 อุปถัมภ์, 2548; งามนิทย์และคณะ, 2545)

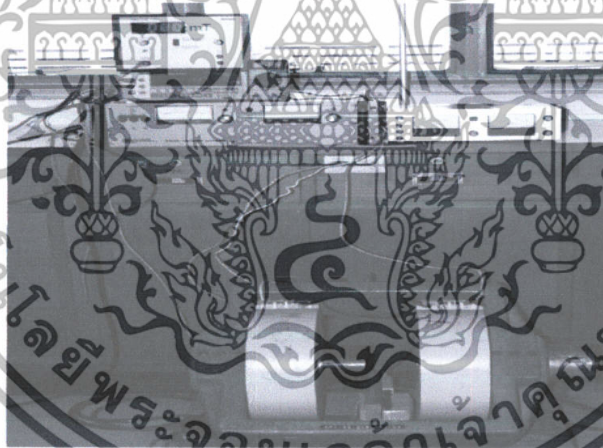
#### 3.2.2.1 การเตรียมฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ $370^{\circ}\text{C}$ มีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. เตรียม  $(\text{SnCl}_2) + \text{H}_2\text{O}$  เข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งสารตั้งต้น  $(\text{SnCl}_2 + \text{H}_2\text{O})$  ปริมาณ 4.5124 กรัม ละลายในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์และ น้ำปilotประจุในอัตราส่วน 3 : 1 ตามลำดับ ให้ได้ปริมาณ 200 ml
2. ชั่งเอ็น-เอ็น ไคเมทิลไซโอยูเรีย ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$ ) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 2.0834 กรัม ละลายใน น้ำปilotประจุปริมาณ 10 CC
3. ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับอยู่ที่  $370^{\circ}\text{C}$
4. นำสารละลายที่ได้ผสมกัน ณ อุณหภูมิห้อง
5. ปรับค่าความดันของก๊าซไนโตรเจน
6. ทำการพ่นละอองสารเคมีลงในสไลด์ที่เตรียมไว้
7. นำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการ
  - ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_K\alpha$  เท่ากับ  $1.5406 \text{ \AA}$
  - ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-6400
  - ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้ โดยทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101PC
  - การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น
  - ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์
  - ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงระบบวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการศึกษาปราคฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> และตรวจสอบสมบัติทางด้านฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อต้องการได้สารกึ่งตัวนำชนิดพีโดยได้กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้ ดังต่อไปนี้

4.1 ฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

การเตรียมฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีจะใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมีเท่ากับ 2 นาที โดยจะทำการเตรียมฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ที่มี [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ซึ่งควบคุมอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับอยู่ที่ 370 °C พบว่าลักษณะของฟิล์มบางที่ได้จะมีลักษณะสีดำ ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณการเจือของสารเจือลักษณะทางกายภาพของฟิล์มจะคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.1

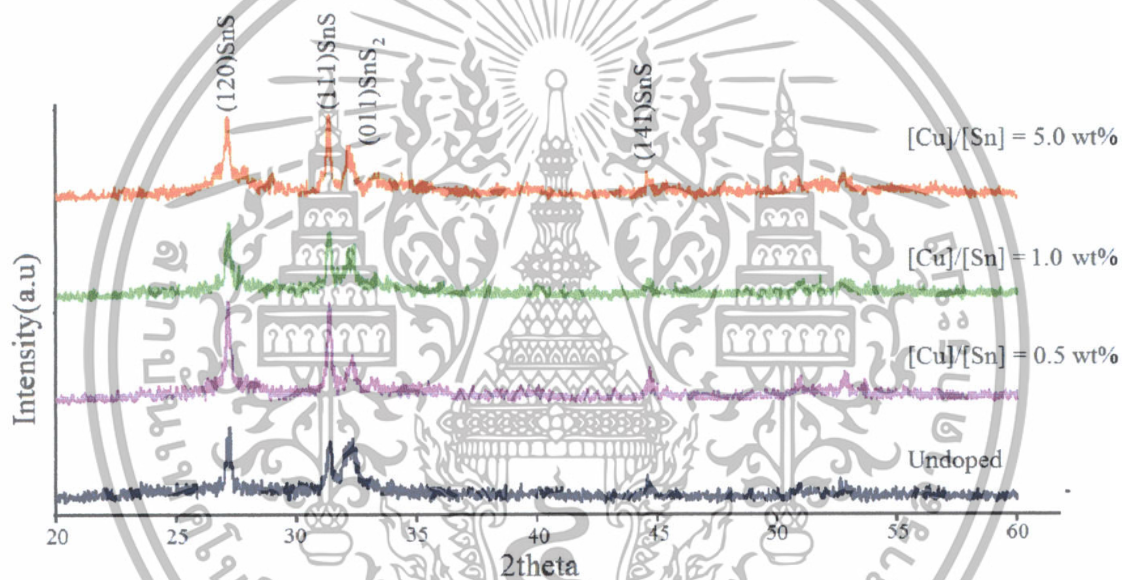


รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที**

ได้นำฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ที่มี [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ดังแสดงผลรูปแบบของการเลี้ยวเบนดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

จากรูปที่ 4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ ฟิล์มบาง SnS แสดงระนาบการเลี้ยวเบนในระนาบ (120) , (111) และ (141) ที่มุม 2θ เท่ากับ 27.225 , 31.424 และ 44.601 องศา ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเจือด้วย Cu ในปริมาณ = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% แล้วจะปรากฏพิคการเลี้ยวเบนในระนาบ (120) , (111) และ (141) ที่มุม 2θ เท่ากับ 27.149, 31.375 และ 44.701 องศา ตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นเป็น 10 wt.% ระนาบการเลี้ยวเบนจะไม่ปรากฏพิคการเลี้ยวเบนขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของระนาบที่ปรากฏกับไฟล์มาตรฐานจะได้โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบออร์โธโรมบิกและจากรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> เอกสารฉบับนี้ขอสงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนการเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่คิดค่าใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้เขียนที่เบอร์โทรศัพท์ 08-1000-10000 หรืออีเมล kornkarn@kmutt.ac.th

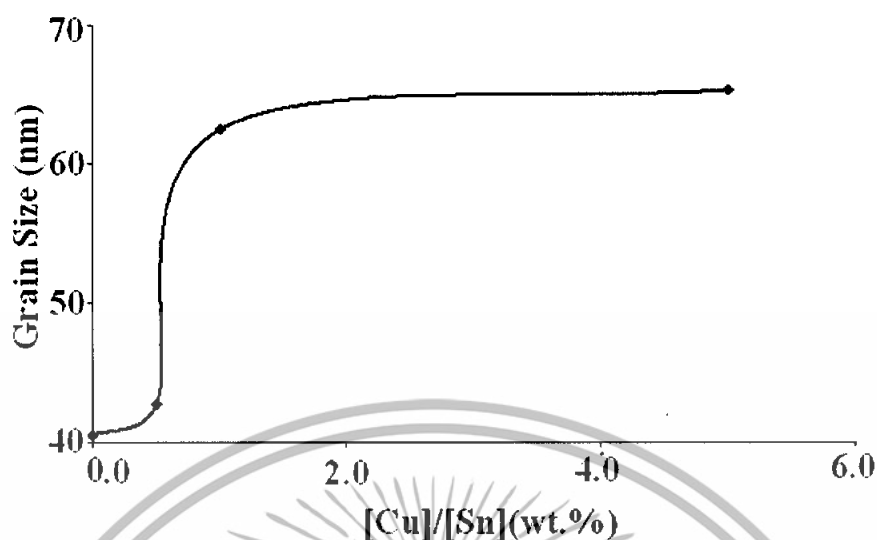
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่อมีการเจือเพิ่มขึ้นทำให้มีการจัดเรียงตัวของผลึกได้ไม่ดีคือสังเกตจากพิกที่ปรากฏเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นเป็น 10 wt.% ผลของการวัดเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้เมื่อคำนวณขนาดของเกรน ซึ่งจะได้ค่าดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 โดยจะเห็นได้ว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของเกรนที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จตุรทรงสี่เหลี่ยมแบบสองกราดของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ใน ปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

[Cu]/[Sn] (wt%)	Grain Size (nm)
0.0	40.51
0.5	42.72
1.0	62.53
5.0	65.37
10.0	-

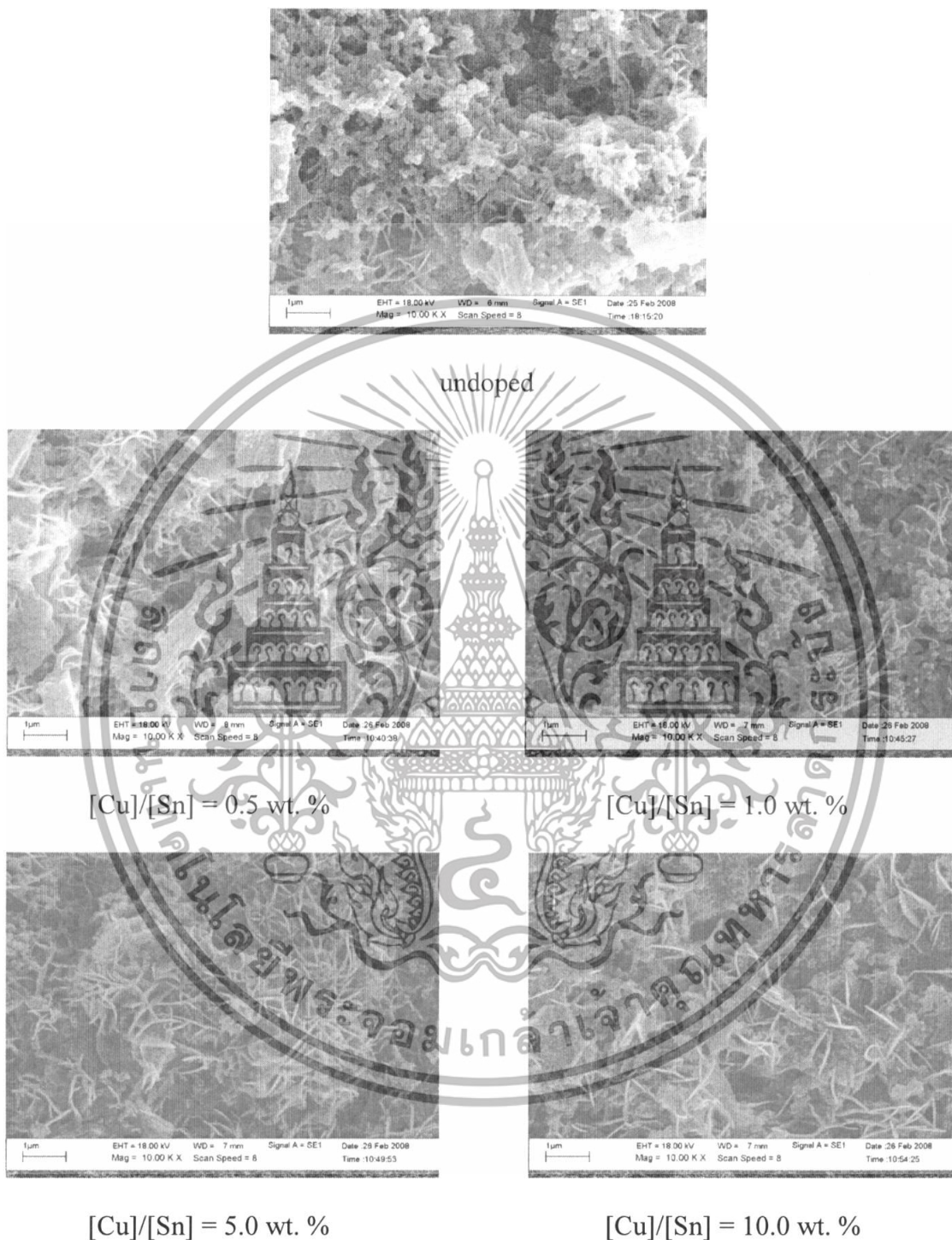
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของเกรนของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

ได้นำฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ที่มี [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วยเชิงมหภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

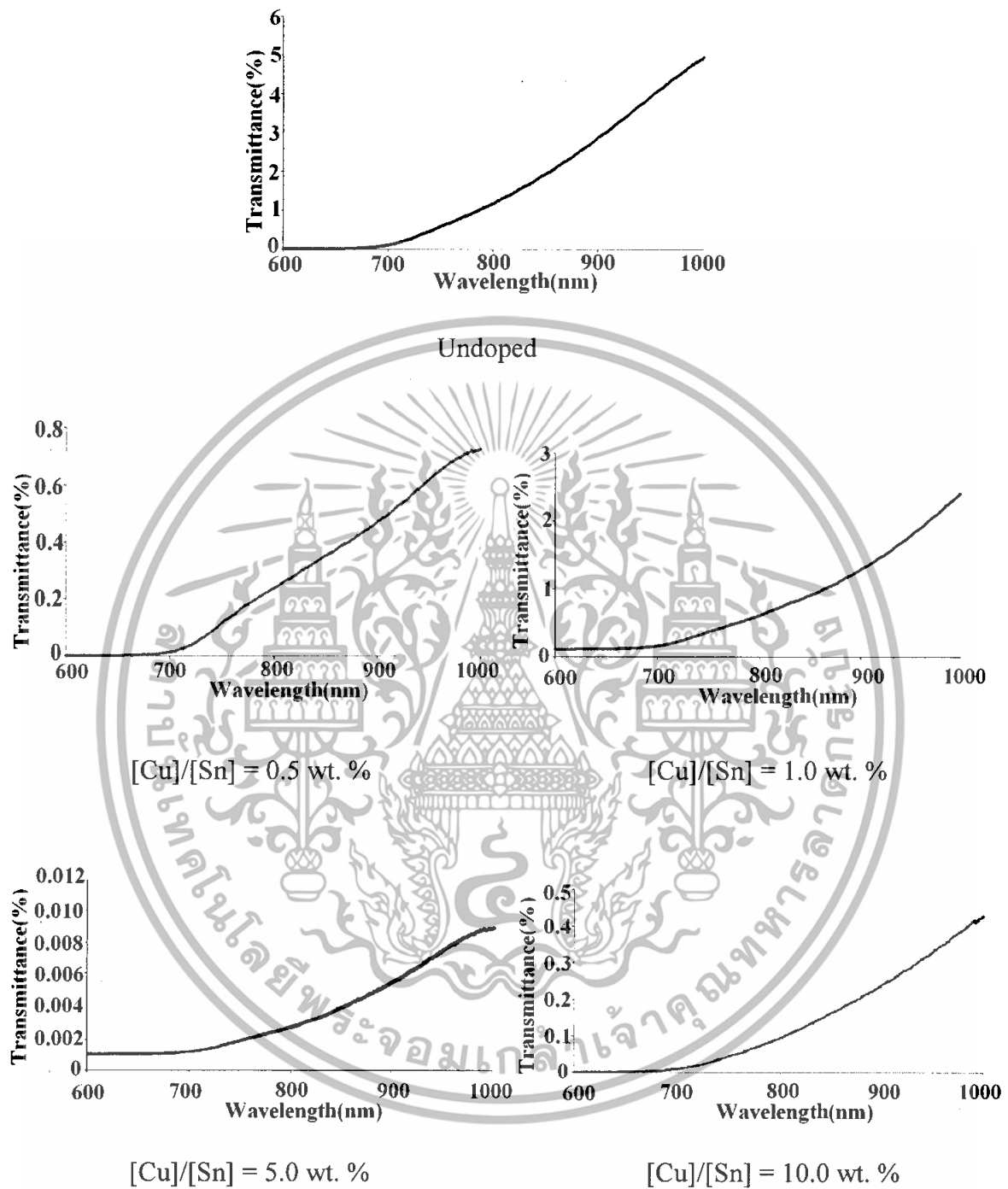
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะผิวหน้าและขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของฟิล์มบาง SnS ที่ไม่ได้เจือด้วย  $\text{CuCl}_2$  มีลักษณะเป็น 2 แบบ คือผสมปนเปกันโดยแบบแรกมีลักษณะค่อนข้างกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางในราว ๆ 200 นาโนเมตร ส่วนเกรนอีกแบบหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบดอกไม้วีโดยที่แผ่นบาง ๆ เหล่านี้มีความหนาราว ๆ 50 นาโนเมตรและยาวประมาณ 750 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มบาง SnS ที่มีสารเจือ  $\text{CuCl}_2$  จะมีลักษณะของเกรนเป็นสองแบบเช่นกัน แต่เมื่อปริมาณสารเจือ  $\text{CuCl}_2$  เพิ่มขึ้น พบว่าเกรนแต่ละกลีบดอกไม้วีจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นและมีขนาดยาวขึ้น โดยที่ความหนาคงเดิม จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางมี 2 เฟส กล่าวคือ เป็นเฟส SnS และ  $\text{SnS}_2$  จากข้อมูลที่ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ไว้ (Ramakrishna Reddy, 2007) จะสรุปได้ว่าเกรนที่มีลักษณะค่อนข้างกลม สอดคล้องกับเฟส SnS ส่วนเกรนที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ คล้ายกลีบดอกไม้วีจะสอดคล้องกับเฟส  $\text{SnS}_2$

#### 4.1.3 การตรวจสอบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS และ $\text{SnS} : \text{CuCl}_2$ ในปริมาณ $[\text{Cu}]/[\text{Sn}] = 0.5, 1.0, 5.0$ และ $10.0 \text{ wt.}\%$ ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ $370^\circ\text{C}$ และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

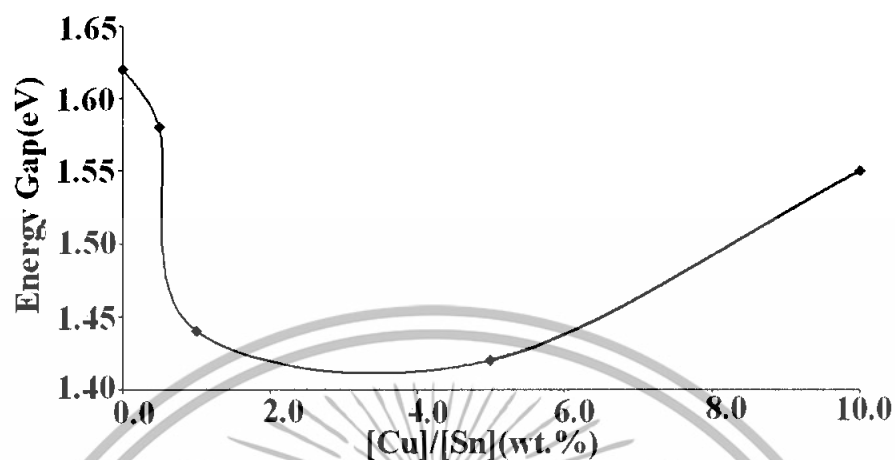
ในการเตรียมฟิล์มบาง SnS และ  $\text{SnS} : \text{CuCl}_2$  ที่มี  $[\text{Cu}]/[\text{Sn}] = 0.5, 1.0, 5.0$  และ  $10.0 \text{ wt.}\%$  ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยมีระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที ลักษณะของฟิล์มที่จะมีลักษณะสีดำนและสามารถส่งผ่านแสงได้ ดังแสดงในรูป 4.5

ฟิล์มบาง  $\text{SnS} : \text{CuCl}_2$  ที่มี  $[\text{Cu}]/[\text{Sn}] = 0.5, 1.0, 5.0$  และ  $10.0 \text{ wt.}\%$  เมื่อทำการเจือด้วย Cu การส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเมื่อพิจารณาจากช่องว่างแถบพลังงานพบว่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{SnS} : \text{CuCl}_2$  ที่มี  $[\text{Cu}]/[\text{Sn}] = 0.5, 1.0, 5.0$  และ  $10.0 \text{ wt.}\%$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $1.42 - 1.62 \text{ eV}$  ดังแสดงในรูป 4.6



รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ใน ปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่น ละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาใน การพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ใน ปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละออง สารเคมี 2 นาที

[Cu]/[Sn] (wt%)	Energy Gap (eV)
0.0	1.62
0.5	1.58
1.0	1.44
5.0	1.42
10.0	1.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที**

ได้นำฟิล์มบางที่ SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าและความต้านทานแผ่นโดยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์และคำนวณปริมาณพาหะข้างมาก และสภาพคล่องของพาหะโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของสารเจือมากขึ้นจะทำให้ปริมาณพาหะข้างมากเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางมีสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงขณะเดียวกันสภาพคล่องฮอลล์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีปริมาณพาหะข้างมากสูงขึ้นโดยฟิล์มบางที่มีปริมาณการเจือ Cu เท่ากับ 10.0 wt.% จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและความต้านทานแผ่นต่ำที่สุดทั้ง 2 กรณี คือ ไม่ฉายแสงและฉายแสงซึ่งกรณีไม่ฉายแสง มีค่าเท่ากับ  $0.16 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$  และ  $1.63 \times 10^8 \Omega\text{/sq}$  ตามลำดับ และกรณีฉายแสงมีค่าเท่ากับ  $0.05 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$  และ  $0.56 \times 10^8 \Omega\text{/sq}$  ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และคำนวณหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณสารเจือมากขึ้นแนวโน้มของค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยจะมากขึ้น โดยจะมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยได้แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS : CuCl<sub>2</sub> จะแสดงดังตาราง 4.4 และ ดังรูปที่ 4.7 - 4.10

นอกจากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์และคำนวณปริมาณพาหะข้างมาก และสภาพคล่องของพาหะโดยปรากฏการณ์ฮอลล์แล้ว ยังได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเพิ่มเติมคือ วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น โดยผลของการวัดค่าจะแสดงดังรูป 4.11 และค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS : CuCl<sub>2</sub> ที่มี [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่ทำให้ทราบได้ว่าค่าพลังงาน E<sub>1</sub> คือ Cu แทนที่ในตำแหน่งของ Sn (Cu<sub>Sn</sub>) , E<sub>2</sub> คือแวนแคนซีของ Sn (V<sub>Sn</sub>) และ E<sub>3</sub> คือพลังงานของอะตอม S แทรกในโครงผลึก (S<sub>I</sub>) จะแสดงดังตาราง 4.4 และรูปที่ 4.12

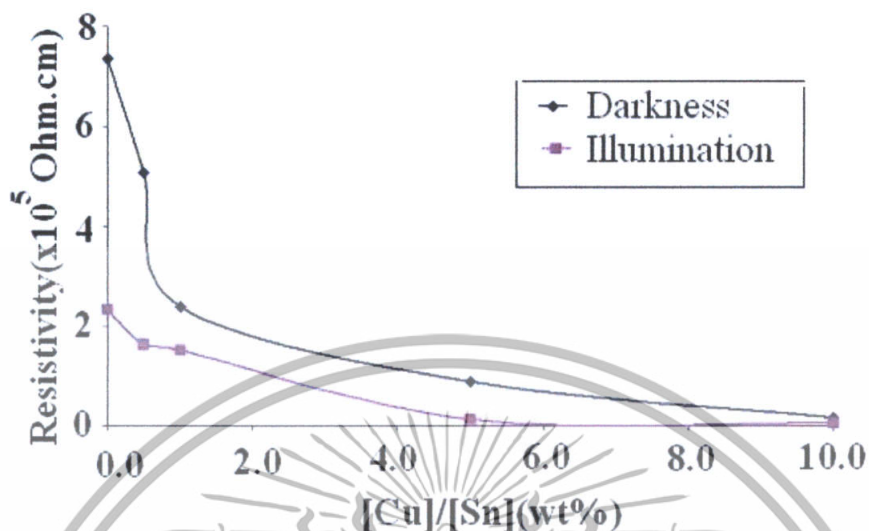
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnS และ SnS: CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

[Cu]/[Sn] (wt%)	Resistivity ( $\times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ )		Sheet Resistance ( $\times 10^8 \Omega/\text{sq}$ )	
	Darkness	Illumination	Darkness	Illumination
0.0	7.36	2.32	73.64	23.20
0.5	5.08	1.63	50.77	16.31
1.0	2.38	1.52	23.83	15.24
5.0	0.89	0.12	8.99	1.25
10.0	0.16	0.05	1.63	0.56

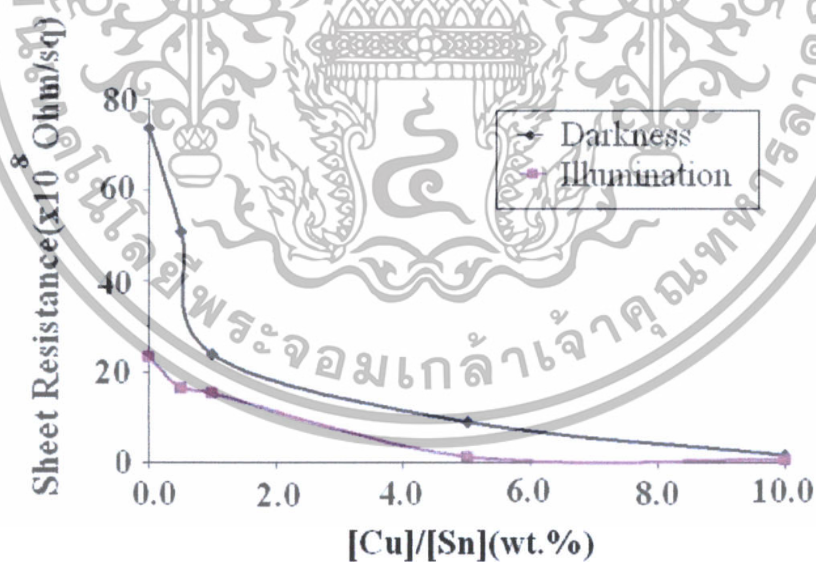
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

[Cu]/[Sn] (wt%)	Hall Coefficient ( $\times 10^4 \text{ cm}^3/\text{C}$ )	Carrier Concentration ( $\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ )	Mobility ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	Mean Free Path (Å)
0.0	2.00	31.40	0.03	0.04
0.5	19.00	3.29	0.37	0.24
1.0	13.00	4.81	0.55	0.41
5.0	8.00	7.81	0.89	0.78
10.0	3.00	20.80	1.84	2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

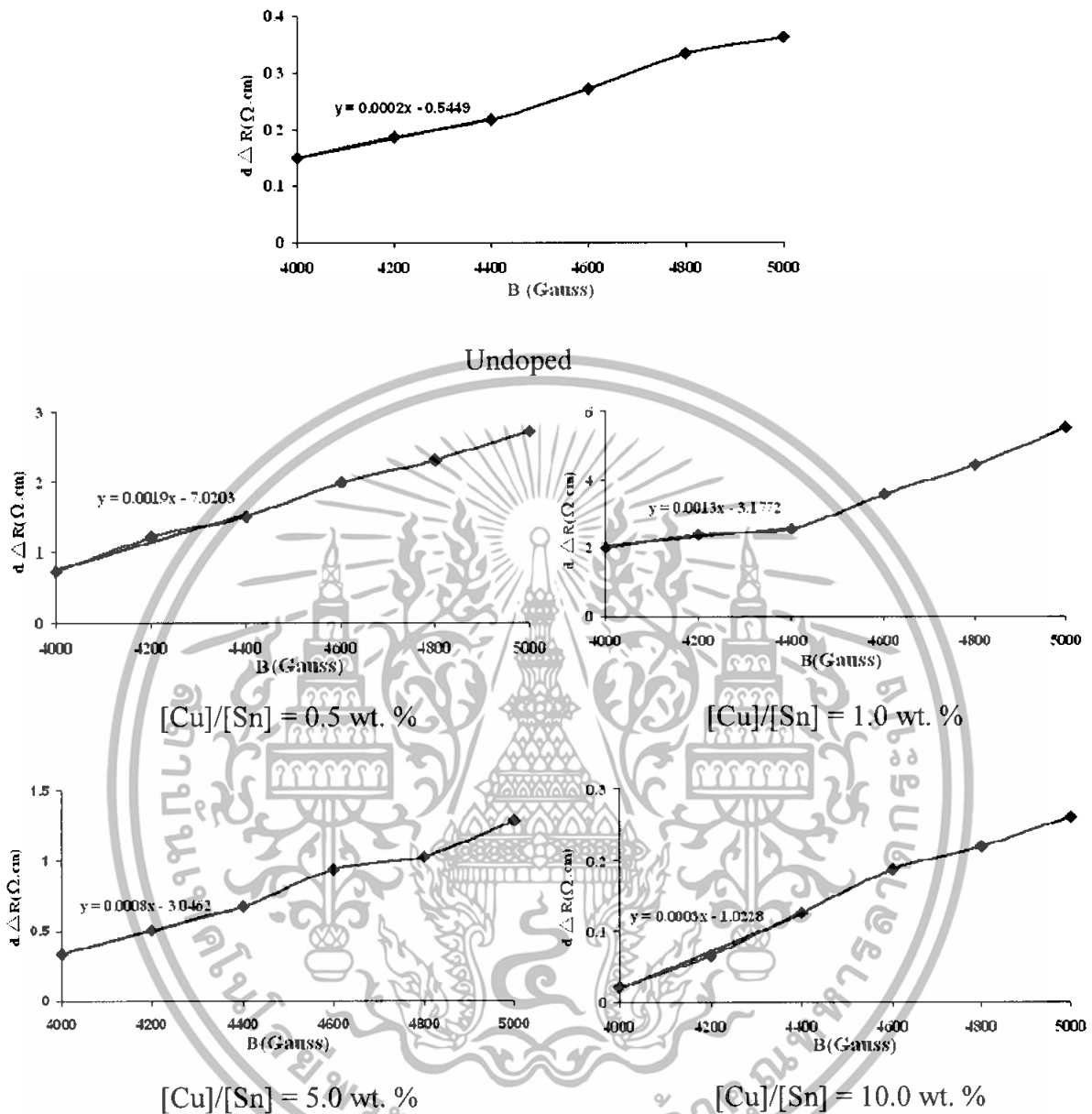


รูปที่ 4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที



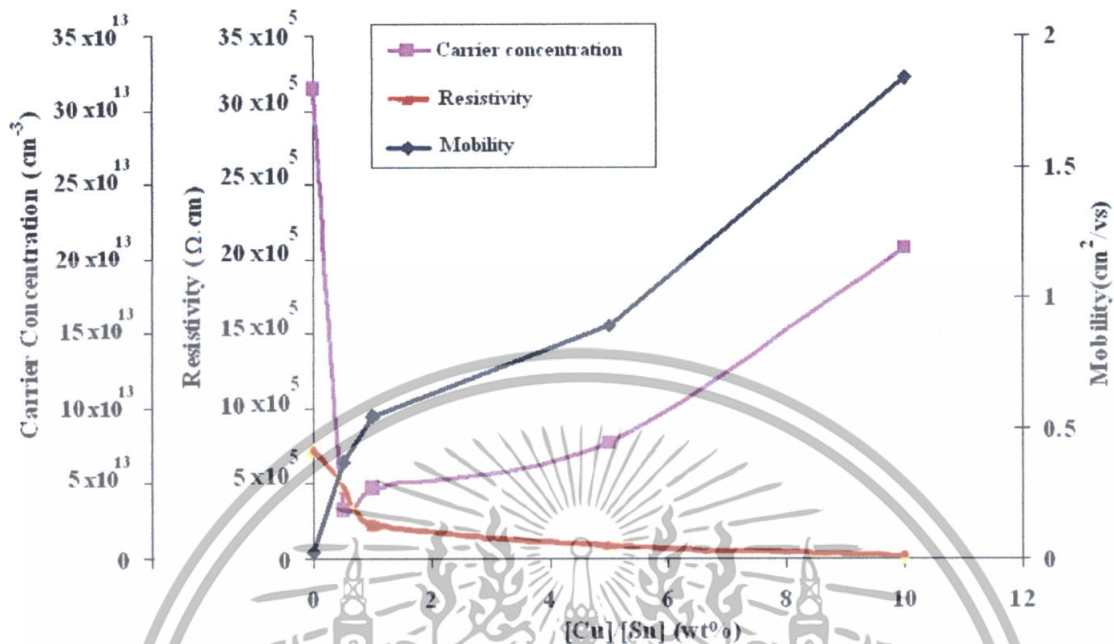
รูปที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

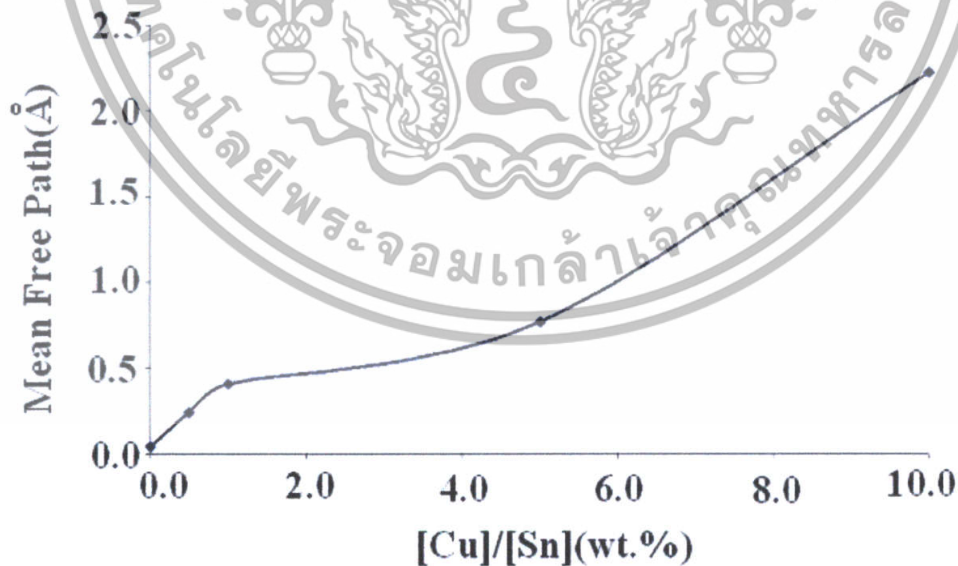


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $d\Delta R$  กับ  $B$  ของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงค่าสภาพคล่องฮอลล์ ปริมาณพาหะข้างมาก และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu nb]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที



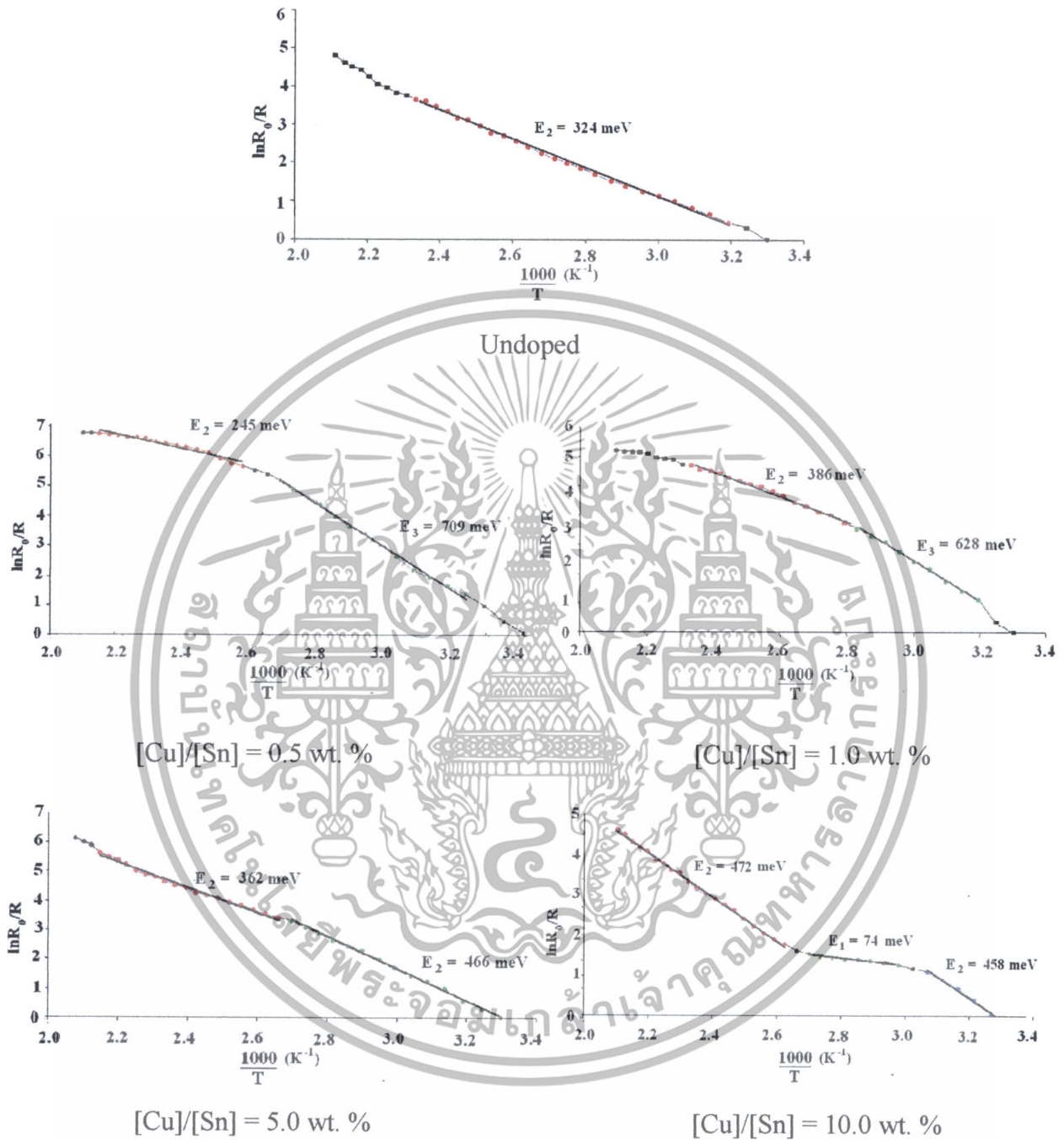
รูปที่ 4.11 แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมี

โดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละออง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารเคมี 2 นาที

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

[Cu]/[Sn] (wt%)	Activation Energy (meV)		
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
0.0	-	324	-
0.5	-	386	628
1.0	-	245	709
5.0	-	362, 466	-
10.0	74	458, 472	-
Defect type	Cu <sub>Sn</sub>	V <sub>Sn</sub>	S <sub>I</sub>

รูปที่ 4.13 แสดงระดับพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> ในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีโดยให้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 370 °C และใช้ระยะเวลาในการพ่นละอองสารเคมี 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

บทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง การวัดสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

การเตรียมฟิล์มบาง SnS และ SnS : CuCl<sub>2</sub> โดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีนั้น ซึ่งจะทำการเตรียมจากสารตั้งต้นคือ SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O และ C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>S โดยเจือ Cu ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักเท่ากับ 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% จากนั้นนำสารตั้งต้น SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O ละลายในไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ และ น้ำปilotประจุในอัตราส่วน 3 : 1 ตามลำดับ ให้ได้ปริมาณ 200 ml หลังจากนั้นนำสารตั้งต้น C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>S ละลายใน น้ำปilotประจุปริมาณ 10 cc หลังจากนั้นนำสารเจือในปริมาณ [Cu]/[Sn] = 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 wt.% มาผสมกับสารละลายที่เตรียมได้ หลังจากนั้นจึงทำการพ่นละอองสารเคมีทุกๆ 2 นาที โดยนำพาด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสได้เท่ากับ 370 °C พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีลักษณะดำ ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณการเจือของสารเจือ และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือ Cu มากขึ้นพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลง โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่ปริมาณการเจือ Cu ด้วยสัดส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางแก้ไข

1. ควรตั้งอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับมีค่าต่ำกว่า  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วจะได้ฟิล์มบางที่เป็นเฟสเฉพาะ SnS
2. ควรเจือด้วยค่าอื่นเช่น Pb จะทำให้นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น
3. ควรมีการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดด้วยฟิล์มแปรได้ (variable range hopping conduction)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- Abelas, F. 1972. **Optical Properties of Solids**. London: North-Holland.
- Cahen, S. David, N. Fioran, J. Maitre, M. Vilas, A. 2003. Thermodynamic Modelling of The O–Sn System. **Thermochimica Acta**. (403): 275-285.
- Cooper, D.G. 1968. **The Periodic Table**. 4<sup>th</sup>. London: Butterworth
- Dieter, K. S. 1998. **Semiconductor Material and Device Characterization**. 2<sup>nd</sup>. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Fahrenbruch, A.L. Bube, R.H. 1983. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion**, pp. 44. New York: Academic Press Inc.
- Haacke, G. 1976. New figure of merit for transparent conductors. **J. Appl. Phys.** (47): 4086-4089.
- Hearle, J.W. S. Sparrow, J.T. Cross, P.M. 1973. **The Use of the Scanning Electron Microscope**. New York: Pergamon Press Ltd.
- Hou, X. Choy, K. 2004. Deposition mechanism and structural characterization of TiO<sub>2</sub> films produced using ESAVD method. **Surf. Coat. Technol.** (180-181): 15-19.  
<http://www.webelements.com>.  
<http://www.teenet.chula.ac.th>.
- Joseph Prince, J. Ramamurthy, S. Subramanian, B. Sanjeeviraja, C. Jayachandran, M. 2002. Spray pyrolysis growth and material properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films. **J. Crys. Growth**. (240): 142-151.
- Klug, H.P. Alexander, L.E. 1974. **X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials** 2<sup>nd</sup>. London: John Wiley & Sons.
- Kittel C. 1971. **Introduction to Solid State Physics** 4<sup>th</sup>. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Moore, D.M. Reynolds, Jr.R.C. 1989. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press Inc.
- Okuya, M. Nakade, K. Osa, D. Nakano, T. Asoka Kumara, G.R. Kaneko, S. 2004. Fabrication of dye – sensitized solar cells by spray pyrolysis deposition (SPD) technique. **J. Photochem. Photobiol. A: Chem.** (164): 167-172.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2545. การเตรียมและ  
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_xZn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานการ  
วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก  
ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.  
รายงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปกรณ สิริเชตรกรรม, 2550. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้  
จากกระบวนการซีลีโนเซชัน. ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- สมฤทธิ วงศ์มณีโรจน์, 2538. ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์  
ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Panda, S.K. Antonakos, A. Liarokapis, E. Bhattacharya, S. Chaudhuri, S. Optical properties of  
nanocrystalline  $SnS_2$  thin films. **Materials Research Bulletin**. (42): 576-583.
- Reddy Koteeswara. and Reddy Ramakrishna. 2005. Optical behaviour of spray tin sulphide thin  
films. **Materials Research Bulletin**. (41): 414-422.
- Reddy Koteeswara and Reddy Ramakrishna. 2006. Preparation and characterization of spray tin  
sulphide films grown at different precursor concentrations. **Materials Chemistry and  
Physics**. (102): 13-18.
- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument** 3<sup>rd</sup>. New York :Mc  
Graw-Hill.
- Salah, H. Bouzouita, H. Rezig, B. 2005. Preparation and characterization of tin sulphide thin films  
by a spray pyrolysis technique. **Thin Solid Films**. (480-481): 439-442.
- Samsonov G.V. 1973. **The Oxide Handbook**. London: Plenum Press.
- Van der Pauw, L.J. 1958. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of  
discs of arbitrary shape. **Philips Res. Repts**. (13): 1-9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ SnS

Pattern : 14-620		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Sn S		2th	l	h	k	l
Herzenbergite, syn / Tin Sulfide		21.984	5	1	1	0
		26.025	10	1	2	0
		27.481	15	0	2	1
		30.495	5	1	0	1
		31.578	25	1	1	1
		32.019	100	0	4	0
		39.046	15	1	3	1
		42.549	1	2	1	0
		44.740	10	1	4	1
		45.595	10	1	5	0
		48.541	5	2	1	1
		51.347	5	1	5	1
		53.178	1	1	2	2
		53.446	5	1	6	0
		54.094	1	2	3	1
		54.267	5	0	6	1
		56.707	5	0	4	2
		63.981	5	2	1	2
		64.129	5	2	5	1
		66.602	1	1	7	1
		66.817	70	0	8	0
		71.403	1	0	8	1
		73.595	1	2	7	0
		75.234	5	1	8	1
		80.272	5	1	9	0
		84.559	5	1	9	1
		90.569	1	1	10	0
		90.890	5	0	6	3
		91.215	5	2	9	0
		95.456	1	2	9	1
		97.443	1	1	9	2
		104.517	1	4	5	0
		106.511	1	1	11	1
		108.007	1	1	10	2
		111.374	15	0	12	0
		112.990	1	2	7	3
		113.480	1	4	3	2
		116.024	1	0	12	1
		120.059	1	2	10	2
		120.171	1	1	12	1
Lattice : Orthorhombic S.G. : Pbnm (62) a = 4.32800 b = 11.19000 c = 3.97800 a/b = 0.38677 c/b = 0.35550 Z = 4		Mol. weight = 150.75 Volume [CD] = 192.66 Dx = 5.197 Dm = 5.220				
MELTING POINT : 882 C COLOR : Black SAMPLE PREPARATION : Synthesized by heating Sn + S in evacuated silica tube at 600 C for several days. Material ground then annealed at 600 C for 2 hours before diffractometer run. GENERAL COMMENTS : 0k0 peaks enhanced by preferred orientation. GENERAL COMMENTS : Boiling point 1230 C. ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-984. GENERAL COMMENTS : Compare teallite. GENERAL COMMENTS : Validated by calculated pattern. GENERAL COMMENTS : Measured density, color and melting point from Handbook of Chemistry and Physics (1973). DELETED AND REJECTED BY : Deleted by 39-354.						
*U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, volume 424, page 347, (1961) primary reference : Mosburg et al. *Handbook of Chemistry and Physics, (1973) optical data :						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54050 SS/FOM : F30= 10(0.0280,106)		Filter : Beta d-sp : Not given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ $\text{SnS}_2$

Pattern : 83-1705		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated																																																																																																																											
<p><math>\text{SnS}_2</math></p> <p>Berndlite-2T / Tin Sulfide</p>		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>2<math>\theta</math></th> <th>I</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15.055</td><td>100</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>28.304</td><td>26</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>30.378</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>32.208</td><td>90</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>42.000</td><td>50</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>46.284</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>50.108</td><td>19</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>52.626</td><td>14</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>55.143</td><td>14</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>58.548</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>59.732</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>60.826</td><td>9</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>63.204</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>67.388</td><td>8</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>70.584</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>70.584</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>77.709</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>80.612</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>81.842</td><td>&lt;1</td><td>0</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>82.600</td><td>6</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>84.712</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>88.520</td><td>6</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>88.719</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>5</td></tr> </tbody> </table>					2 $\theta$	I	h	k	l	15.055	100	0	0	1	28.304	26	1	0	0	30.378	3	0	0	2	32.208	90	0	1	1	42.000	50	0	1	2	46.284	4	0	0	3	50.108	19	1	1	0	52.626	14	1	1	1	55.143	14	1	0	3	58.548	3	2	0	0	59.732	2	1	1	2	60.826	9	2	0	1	63.204	3	0	0	4	67.388	8	2	0	2	70.584	5	1	1	3	70.584	5	0	1	4	77.709	4	0	2	3	80.612	1	2	1	0	81.842	<1	0	0	5	82.600	6	1	2	1	84.712	5	1	1	4	88.520	6	1	2	2	88.719	4	0	1	5
2 $\theta$	I	h	k	l																																																																																																																										
15.055	100	0	0	1																																																																																																																										
28.304	26	1	0	0																																																																																																																										
30.378	3	0	0	2																																																																																																																										
32.208	90	0	1	1																																																																																																																										
42.000	50	0	1	2																																																																																																																										
46.284	4	0	0	3																																																																																																																										
50.108	19	1	1	0																																																																																																																										
52.626	14	1	1	1																																																																																																																										
55.143	14	1	0	3																																																																																																																										
58.548	3	2	0	0																																																																																																																										
59.732	2	1	1	2																																																																																																																										
60.826	9	2	0	1																																																																																																																										
63.204	3	0	0	4																																																																																																																										
67.388	8	2	0	2																																																																																																																										
70.584	5	1	1	3																																																																																																																										
70.584	5	0	1	4																																																																																																																										
77.709	4	0	2	3																																																																																																																										
80.612	1	2	1	0																																																																																																																										
81.842	<1	0	0	5																																																																																																																										
82.600	6	1	2	1																																																																																																																										
84.712	5	1	1	4																																																																																																																										
88.520	6	1	2	2																																																																																																																										
88.719	4	0	1	5																																																																																																																										
<p>Lattice : Hexagonal</p> <p>S.G. : P-3m1 (164)</p> <p>a = 3.63800</p> <p>c = 5.88000</p> <p>Z = 1</p>	<p>Mol. weight = 182.81</p> <p>Volume [CD] = 67.40</p> <p>Dx = 4.504</p> <p>V/cor = 7.70</p>																																																																																																																													
<p>ICSD COLLECTION CODE : 100610            TEMPERATURE FACTOR : ITF            REMARKS FROM ICSD : REM PRE Mentioned.            ADDITIONAL PATTERN : See PDF 23-677.</p>																																																																																																																														
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference :            *Am. Mineral., volume 63, page 289, (1978) :            Hazen, R.M., Finger, L.W.</p>																																																																																																																														
<p>Radiation : CuK<math>\alpha</math>1</p> <p>Lambda : 1.54060</p>		<p>Filter : Not specified</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>																																																																																																																												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณปริมาณสารตั้งต้น**

มวลโมเลกุลของธาตุ

Sn	=	118.71	กรัม/โมล
N	=	14.01	กรัม/โมล
H	=	1.01	กรัม/โมล
C	=	12.01	กรัม/โมล
Cl	=	35.45	กรัม/โมล
O	=	16.00	กรัม/โมล
S	=	16.00	กรัม/โมล

มวล  $\text{SnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  = 225.626 กรัม/โมล

มวล  $\text{C}_3\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$  = 104.174 กรัม/โมล

$\text{SnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  = 225.626 กรัม/ลิตร

$\text{C}_3\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$  = 104.174 กรัม/ลิตร

การเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของ Sn 0.1 โมล

1 โมล = 225.626 กรัม/ลิตร

0.05 โมล = 11.2813 กรัม/ลิตร

เพราะฉะนั้นต้องใช้

$\text{SnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  = 11.2813 กรัมในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร

$\text{SnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  = 2.2562 กรัมในสารละลาย 200 มิลลิลิตร

$\text{SnCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  = 4.5124 กรัมในสารละลาย 0.1 โมล

การเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของ  $\text{C}_3\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$  0.1 โมล

$\text{C}_3\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$  = 104.174 กรัม/ลิตร

1 โมล = 104.174 กรัม/ลิตร

0.05 โมล = 5.087 กรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นต้องใช้	$C_3H_8N_2S$	=	5.087 กรัมในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร
	$C_3H_8N_2S$	=	1.0417 กรัมในสารละลาย 200 มิลลิลิตร
	$C_3H_8N_2S$	=	2.0824 กรัมในสารละลาย 0.1 โมล

ตั้งนั้น เมื่อเตรียม	[Cu]/[Sn]	=	0.5 wt.%	
ปริมาณของ	Cu	=	(1x2.37)/100	กรัม
	Cu	=	0.0237	กรัม
มวลโมเลกุลของ	$CuCl_2$	=	134.446	กรัม
มวลของ	$SnCl+2H_2O_2$	=	225.626	กรัม
	$SnCl_2$	=	225.626x(0.5/100)	กรัม
	$CuCl_2$	=	0.0025	กรัม
ตั้งนั้น เมื่อเตรียม	[Cu]/[Sn]	=	1.0 wt.%	กรัม
ปริมาณของ	Cu	=	(1x2.37)/100	กรัม
	Cu	=	0.0237	กรัม
มวลโมเลกุลของ	$CuCl_2$	=	134.446	กรัม
มวลของ	$SnCl+2H_2O_2$	=	225.626	กรัม
	$SnCl_2$	=	225.626x(1/100)	กรัม
	$CuCl_2$	=	0.0451	กรัม
ตั้งนั้น เมื่อเตรียม	[Cu]/[Sn]	=	5.0 wt.%	กรัม
ปริมาณของ	Cu	=	(1x2.37)/100	กรัม
	Cu	=	0.0237	กรัม
มวลโมเลกุลของ	$CuCl_2$	=	134.446	กรัม
มวลของ	$SnCl+2H_2O_2$	=	225.626	กรัม
	$SnCl_2$	=	225.626x(5/100)	กรัม
	$CuCl_2$	=	0.2256	กรัม
ตั้งนั้น เมื่อเตรียม	[Cu]/[Sn]	=	10.0 wt.%	กรัม
ปริมาณของ	Cu	=	(1x2.37)/100	กรัม
	Cu	=	0.0237	กรัม
มวลโมเลกุลของ	$CuCl_2$	=	134.446	กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของ	$\text{SnCl}+2\text{H}_2\text{O}_2$	=	225.626	กรัม
	$\text{SnCl}_2$	=	$225.626 \times (10/100)$	กรัม
	$\text{CuCl}_2$	=	0.4512	กรัม

เพราะฉะนั้นจะต้อง

เตรียม $[\text{Cu}]/[\text{Sn}]$	=	0.5 wt.% จะได้	=	0.0025	กรัม
เตรียม $[\text{Cu}]/[\text{Sn}]$	=	1.0 wt.% จะได้	=	0.0451	กรัม
เตรียม $[\text{Cu}]/[\text{Sn}]$	=	5.0 wt.% จะได้	=	0.2256	กรัม
เตรียม $[\text{Cu}]/[\text{Sn}]$	=	10 wt.% จะได้	=	0.4512	กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

หาค่าขนาดของเกรน

จากสมการ

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta}$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเกรน  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น  
 $\beta$  คือ ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด

ตัวอย่าง การคำนวณเมื่อให้ปริมาณสารเจือที่แตกต่างกัน

เมื่อไม่มีการเจือสาร ใช้เวลา 2 นาที

$$D = \frac{1.5418 \times 10^{-10}}{(2.26 \times 10^{-3}) \cos 15.712}$$
$$= 40.51 \times 10^{-9} \text{ m}$$

เมื่อมีปริมาณสารเจือ 0.5 wt.% เป็นเวลา 2 นาที

$$D = \frac{1.5418 \times 10^{-10}}{(1.63 \times 10^{-3}) \cos 15.712}$$
$$= 42.72 \times 10^{-9} \text{ m}$$

เมื่อมีปริมาณสารเจือ 1.0 wt.% เป็นเวลา 2 นาที

$$D = \frac{1.5418 \times 10^{-10}}{(6.62 \times 10^{-4}) \cos 15.687}$$
$$= 62.53 \times 10^{-9} \text{ m}$$

เมื่อมีปริมาณสารเจือ 5.0 wt.% เป็นเวลา 2 นาที

$$D = \frac{1.5418 \times 10^{-10}}{(3.12 \times 10^{-3}) \cos 15.686}$$
$$= 65.37 \times 10^{-9} \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าสภาพคล่องพาหะ ความหนาแน่นพาหะ และค่าระยะทางเฉลี่ย  
จากสมการ

$$R_H = \frac{10^8 \cdot d \cdot V_H}{I_x \cdot B_z}$$

เมื่อ	d	คือ	ความหนาฟิล์ม (cm)
	$R_H$	คือ	ค่าคงที่ฮอลล์ ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )
	$I_x$	คือ	กระแสไฟฟ้า (A)
	$B_z$	คือ	สนามแม่เหล็ก (G)
	$V_H$	คือ	แรงดันฮอลล์ (V)

คำนวณหาค่าสภาพคล่องฮอลล์  
จากสมการ

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

เมื่อ	$\mu_H$	คือ	สภาพคล่องพาหะ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
	$\rho$	คือ	สภาพต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ( $\Omega\text{-cm}$ )
	$R_H$	คือ	ค่าคงที่ฮอลล์ ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )

คำนวณหาค่าความหนาแน่นพาหะ  
จากสมการ

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

เมื่อ	n	คือ	ความหนาแน่นพาหะ ( $\text{cm}^{-3}$ )
	Q	คือ	ประจุอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
	$R_H$	คือ	ค่าคงที่ฮอลล์ ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำนวณหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย

จากสมการ

$$l = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H$$

เมื่อ	l	คือ	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (Å)
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
	e	คือ	ประจุอิเล็กตรอน ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ )
	n	คือ	ความหนาแน่นพาหะ ( $\text{cm}^{-3}$ )
	$\mu_H$	คือ	สภาพคล่องพาหะ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายพงษ์หริินทร์ เปี่ยมพงษ์สานต์ เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ.2529 เป็นคนกรุงเทพมหานคร โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจากโรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2547

นางสาวภัทราพร แสนคำ เกิดเมื่อวันที่ 25 กันยายน พ.ศ.2528 เป็นคนจังหวัดกาฬสินธุ์ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ กรุงเทพมหานคร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2547

นางสาวศุภิกา โส้สกุลชัย เกิดเมื่อวันที่ 24 มกราคม พ.ศ.2528 เป็นคนกรุงเทพมหานคร โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษาจากโรงเรียนสายน้ำผึ้ง กรุงเทพมหานคร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้