

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมโดยวิธีการ
ระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF CdSe THIN FILMS PREPARED BY CLOSE
SPACED SUBLIMATION



ราตรี ภูรอด
สุนิสสา อุดมมาลี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมโดยวิธีการ
ระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
CHARACTERIZATION OF CdSe THIN FILMS PREPARED BY CLOSE
SPACED SUBLIMATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อจุดประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

CHARACTERIZATION OF CdSe THIN FILMS PREPARED BY CLOSE
SPACED SUBLIMATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
CHARACTERIZATION OF CdSe THIN FILMS PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION

ชื่อนักศึกษา นางสาวราตรี ภู่ออด รหัสนักศึกษา 54050583
นางสาวสุนิสา อุดมมาลี รหัสนักศึกษา 54050625

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาดาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
ชื่อนักศึกษา	นางสาวราตรี ภูรอด รหัสนักศึกษา 54050583 นางสาวสุนิสา อุดมมาลี รหัสนักศึกษา 54050625
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 และ 590 องศาเซลเซียสตามลำดับ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทุกค่าของเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เป็นแบบเฮกซะโกนัล จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะโตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นจาก 1.71 เป็น 1.78 อิเล็กตรอนโวลต์ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0$ ถึง $x=0.05$ จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงจาก 2.88×10^3 เป็น 1.50×10^3 โอห์ม·เซนติเมตร ตามสัดส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0$ ถึง $x=0.05$ สำหรับสภาพคล่องฮอลล์มีค่ามากที่สุดที่ $x=0.01$ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของพาหะในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ $x=0.04$ และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น ได้ทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ในช่วง 190 และ 300 เคลวิน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต ส่วนสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 190 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองของการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

คำสำคัญ : กลไกการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ปรากฏการณ์ของฮอลล์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	CHARACTERIZATION OF CdSe THIN FILMS PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION		
Students	Miss. Ratre	Phoorod	student ID 54050583
	Miss. Sunisa	Audommalee	student ID 54050625
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics		
Department	Physics		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang		

ABSTRACT

In this special project, $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) thin films have been prepared on slide glass substrate by close spaced sublimation method. The source and glass substrate temperatures were fixed at 650 and 590°C, respectively. The crystal structure of the whole compositions is belong to hexagonal system. From SEM micrographs, grain size of the thin films increases with increasing mole fraction x values. A blue shift in the energy gap of the thin films has been observed. The energy gap widens from 1.71 to 1.78 eV with the mole fraction x increases from $x=0$ to $x=0.05$. Electrical properties of the thin films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. Resistivity of the films decreases from 2.88×10^3 to $1.50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ with the mole fraction x increasing from 0 to 0.05. Maximum value of Hall mobility at $x=0.01$ is $531.22 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ and then decreases with an increase in mole fraction x . Electrical conductivity measurements were performed at low temperature in the range 20-300 K. The temperature dependence of electrical conductivity in CdSe thin films between 190 and 300 K was interpreted in terms of Seto's model. The conductivity at lower temperature ($< 190 \text{ K}$) is well described by Mott's variable range hopping model (VRH).

Keywords : $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ thin films, Close spaced sublimation method, Hall effect, VRH model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ รศ.ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลองและอุปการะทุนในการสนับสนุน ตลอดจนการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงการปลุกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อศึกษาลักษณะต่างๆของชิ้นงาน จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และการอบรมสั่งสอนสิ่งต่างๆตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนการศึกษา การอบรมสั่งสอน รวมถึงกำลังใจโดยตลอดมา

นางสาวราตรี ภู่ออด

นางสาวสุนิสา อุดมมาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	9
2.1.3 ขอบกพร่องผลึก	10
2.1.3.1 ขอบกพร่องผลึกแบบจุด	10
2.1.3.2 ขอบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	10
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	12
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	15
2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	18
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	20
2.4.5 ส่วนทางของแถบพลังงาน	22
2.4.6 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	23
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	27
2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	27
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	28
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็็กซ์ทรีนสิก	30
2.6 สภาพนำไฟฟ้า	34
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	35
2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	37
2.8 ปრაกฏการณ์ฮอลล์	38
2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	43
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	45
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	46
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมี่ปานกลาง	48
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	51
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อน	53
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตฮาลง	60
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	62
2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	63
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	65
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	74
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	74
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียม ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่ บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	75
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	75
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	75
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า.	75
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	75
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	75
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง ประชิด"คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	76
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	78
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่ง $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	81
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	81
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	81
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	81
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	81
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	87
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	87
4.2 ผลการศึกษาศสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	89
4.2.1 ผลการศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	89
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	94
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	95
4.2.4 ผลการศึกษาศเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	97

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.4.1 ผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	102
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	106
4.2.5.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	106
4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	107
4.2.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	110
4.2.5.4 การศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	116
4.2.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	122
5.1 สรุปผลการวิจัย	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
บรรณานุกรม	125
ภาคผนวก ก	128
ภาคผนวก ก	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	25
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 และ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	78
4.1 แสดงค่าคงที่โครมผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	97
4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	99
4.4 แสดงค่าส่วนทางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	101
4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	105
4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	106
4.7 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	109
4.8 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งเจ้าของเอกสารขอสงวนสิทธิ์นำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงคือรั้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	121



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	4
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3 แสดงโครงสร้างแบบเวิร์ทไซด์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์	9
2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	11
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	11
2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	12
2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	13
2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย	15
ก. ฉนวน	ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์	จ. โลหะ
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	ฉ. สารกึ่งโลหะ
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	17
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	17
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	18
2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน	20
2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	22
2.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	23
2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	24
2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	25
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	31
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	36
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	37
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	39
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	43
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I)	44
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์ ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน	46
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$	50
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^2$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^2$ กับ $\frac{-1}{T^4}$	50
2.28 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{ce}) และ กักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{ch}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	54
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตซาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตซาของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान	57
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान ทั้งช่วงกระแสโฟโตซาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตซาหลง	58
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตซาหลง	61
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตซาขึ้น	62
2.33 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdSe:Sb$ ($x=0\%, 0.5\%, 1\%, 2.5\%$) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า	66

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	67
2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	67
2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	68
2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe	69
2.38 แสดงสเปกตรัมของพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	70
2.39 แสดงภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	71
2.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	71
2.41 แสดงค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	72
2.42 แสดงค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	73
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอุณหภูมิ กับ เวลาที่ใช้ ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	80
3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	80
3.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และ ศักย์ไฟฟ้า (V) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	82
3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	82
3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	83
3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	84
3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	85
3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	88
4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	88
4.3 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	89
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91
4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหา ค่าขนาดเกรน กับ ค่าความเครียด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	92
4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	94
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	95
4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	96
4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	96

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	97
4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	98
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	99
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \alpha$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	100
4.14 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	102
4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 700-900 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	103
4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 2000-3500 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	104
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	107

เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	107
4.19 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	108
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_3) ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	108
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	109
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	110
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \left(\frac{R_0}{R} \right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	116
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	117
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	120

เอกสารนี้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสจอร์มัลไลซ์ชาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟิล์มบางแคดเมียมเซลีนไนด์ (CdSe) เป็นสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1-3 อิเล็กตรอนโวลต์ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงอยู่ในย่านตามองเห็นได้ และเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์จำพวกเซลล์แสงอาทิตย์ ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง และสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง (LED) เป็นต้น

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนมีบทบาทมากขึ้น ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความสนใจมากในการศึกษาและพัฒนา เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อมลพิษในขณะที่ผลิตกระแสไฟฟ้า แต่สิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังมีต้นทุนสูงในการผลิต และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นยังไม่สูงนัก ดังนั้นจึงเป็นที่สนใจในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะคือ สามารถแปลงพลังงานโฟตอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาตกกระทบจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) (งามนิตย์, 2543; Kittel, 1971)

ในปัจจุบันฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเซลีนไนด์สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธีเช่น การพาไอระเหยสารเคมี (CVD) สเป็คเตอรึง กระบวนการโซลเจล และ การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (CSS) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ผลการศึกษาได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค ผลการศึกษาสมบัติทางแสง ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของข้อบกพร่องผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ

2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
5. เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ นอกจากนี้ยังทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20–300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303–473 เคลวิน เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)
7. เพื่อศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการฉายแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดในระบบสุญญากาศ
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
5. ศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้
6. ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ปรอท-วาไรสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
7. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่มีการฉายแสง วัดปรากฏการณ์ฮอลล์ นอกจากนี้ยังทำการวัดค่าความ

- ด้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303–473 เคลวิน เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น
8. ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการฉายแสง ตกกระทบแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
 9. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
3. มีความรู้ความเข้าใจสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) รวมถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้
4. มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

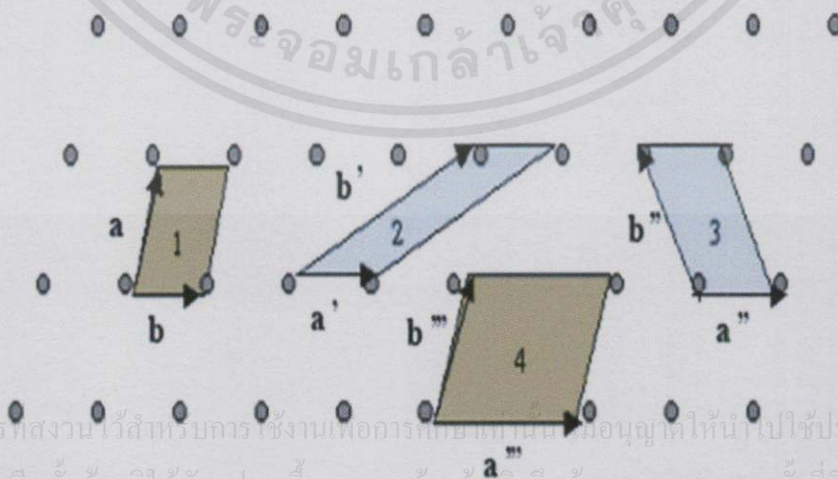
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิิตย์, 2531; งามนิิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

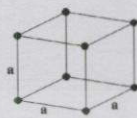

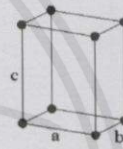


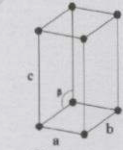
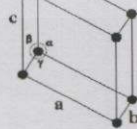
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \bar{a} , \bar{b} และ \bar{c} และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่สี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

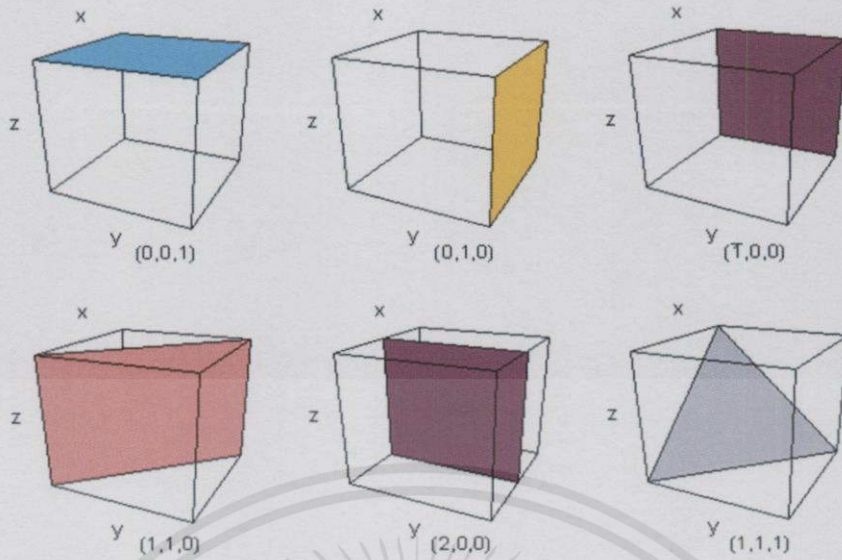
เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่ากล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก
การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[uvw]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บกำกับ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
 - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
 - 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
 - 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

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

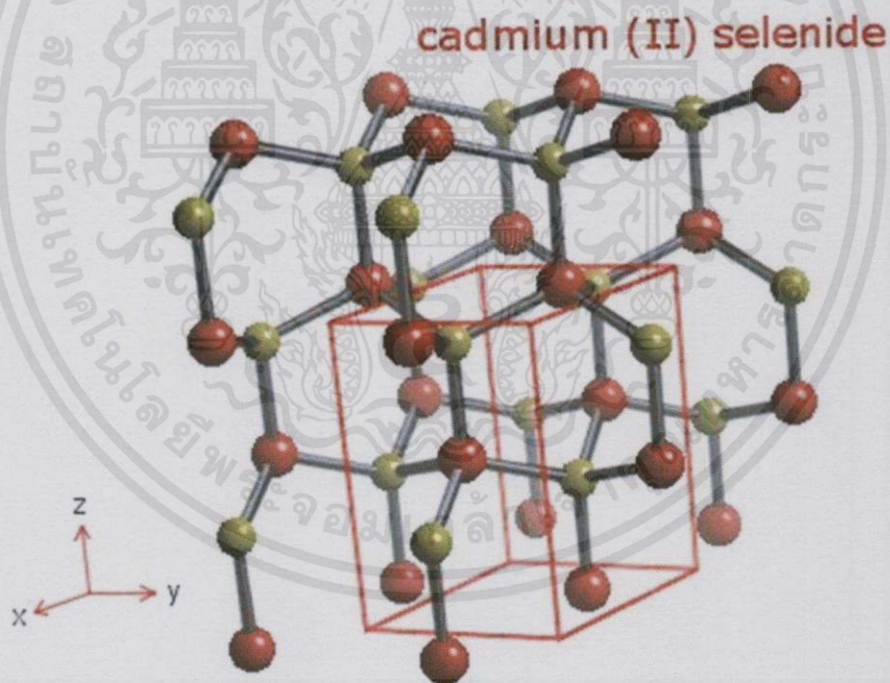
$$l = -(h + k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า $(11\bar{2}0)$ ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง $[hkl]$ จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง $[102]$ จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS, ZnS, CdSe เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

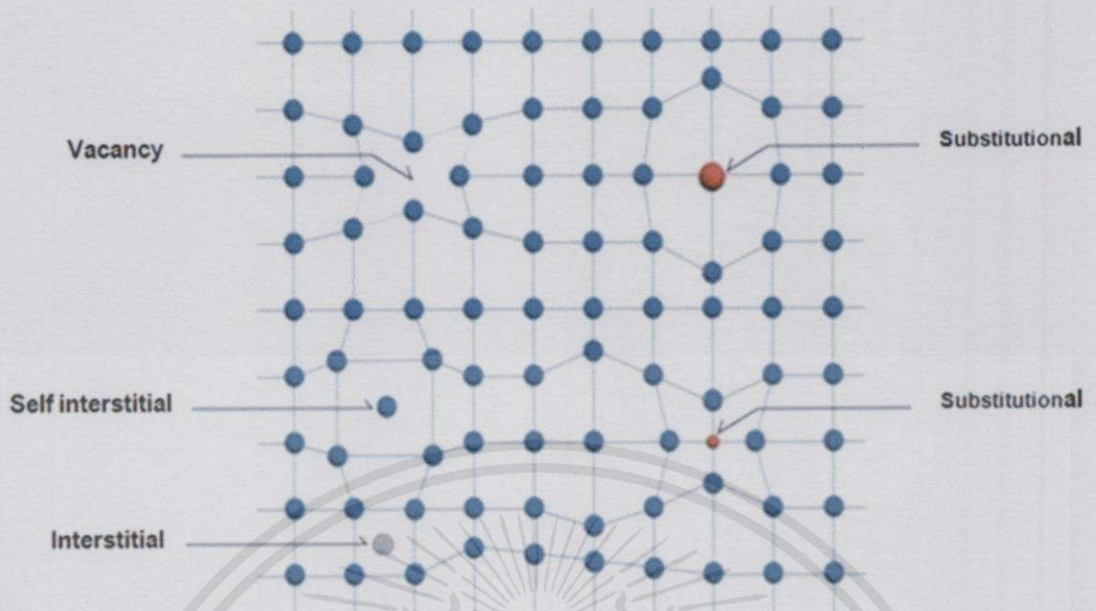
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

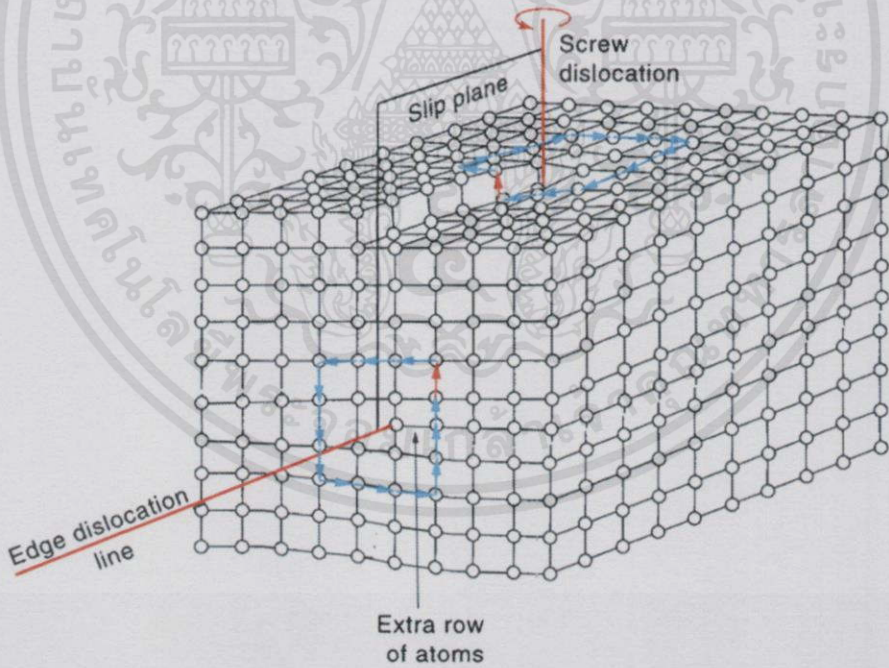
2.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



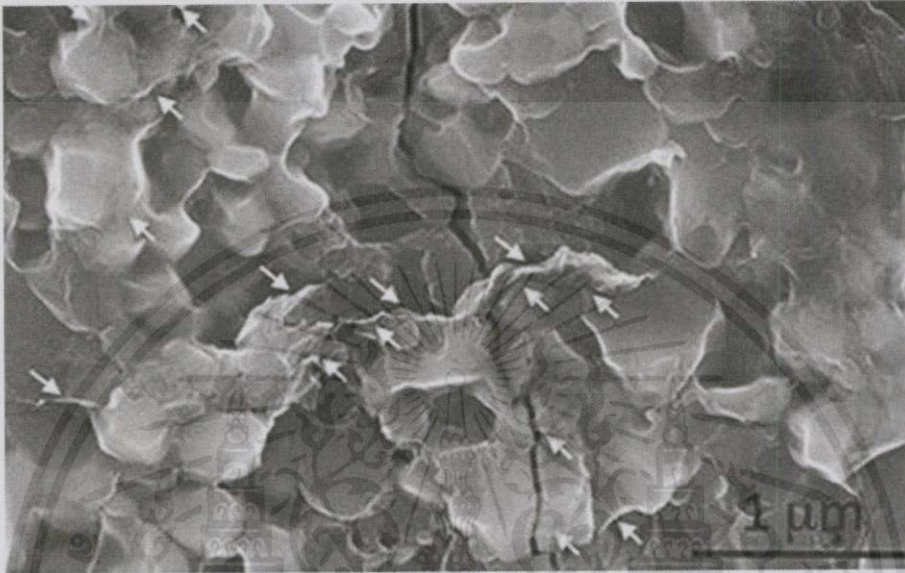
รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

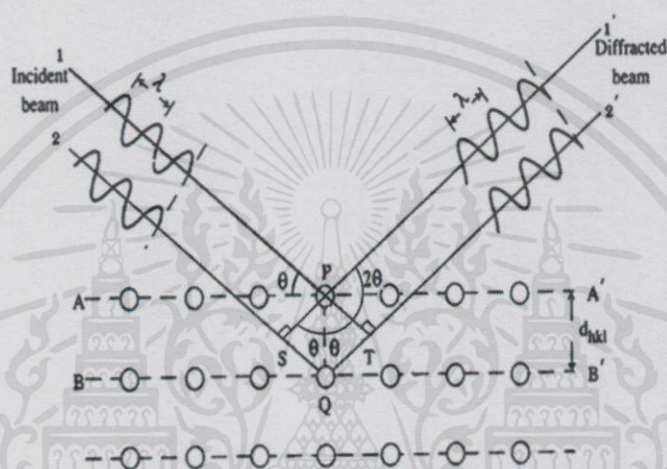
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลง $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$ อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.2)

เมื่อ d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
θ	คือ	มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
n	คือ	ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
λ	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.7



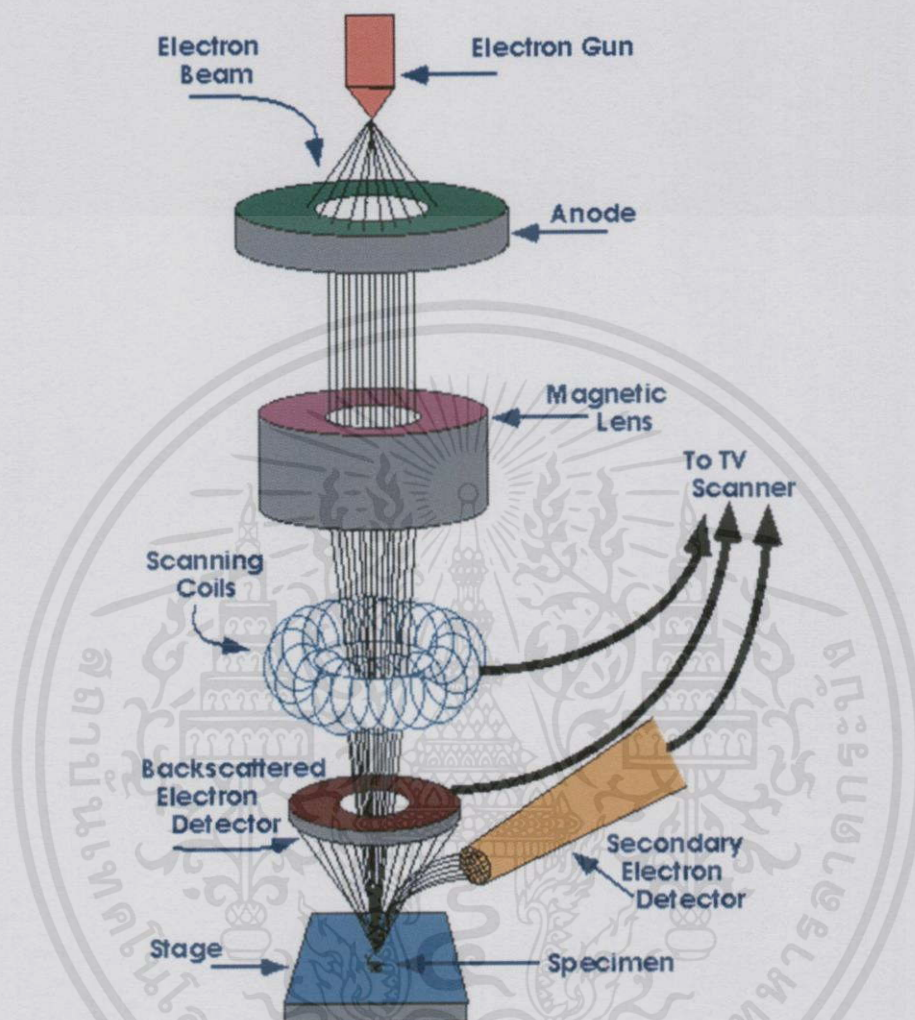
รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกระดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter : d_p)
2. กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current : i_p)
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence : α_p)

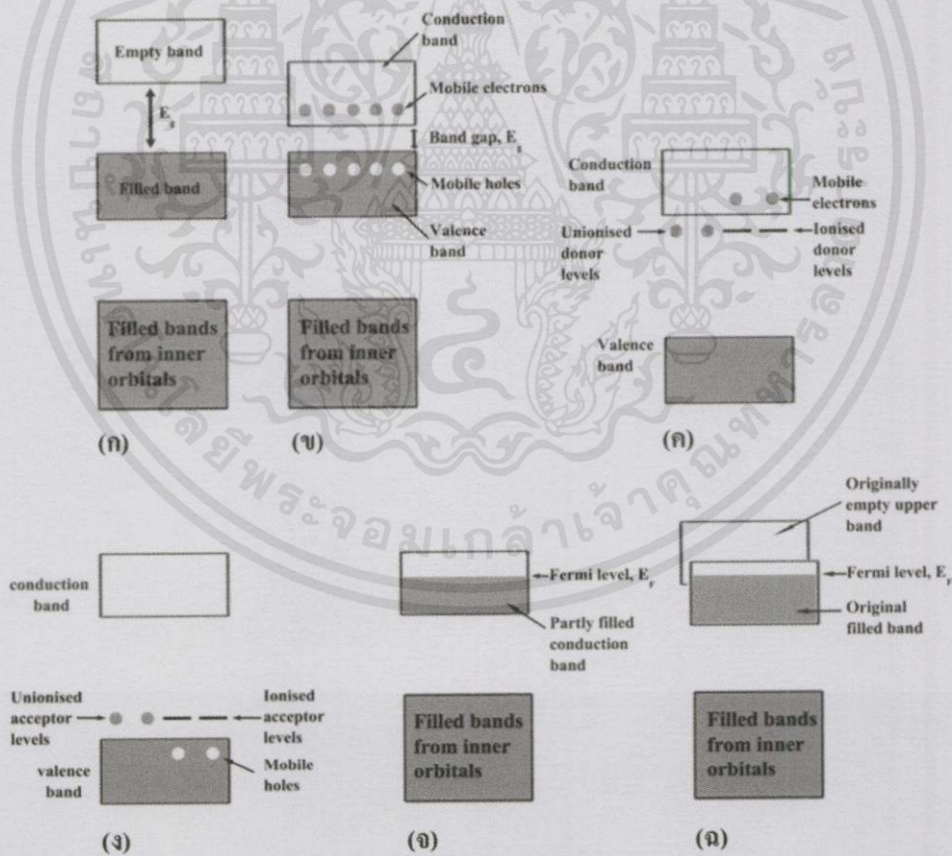
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
 ไม่ว่าการตีพิมพ์หรือการเผยแพร่ในรูปแบบใดก็ตาม โดยผู้จัดทำขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
 ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้อาจสามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap: E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550)

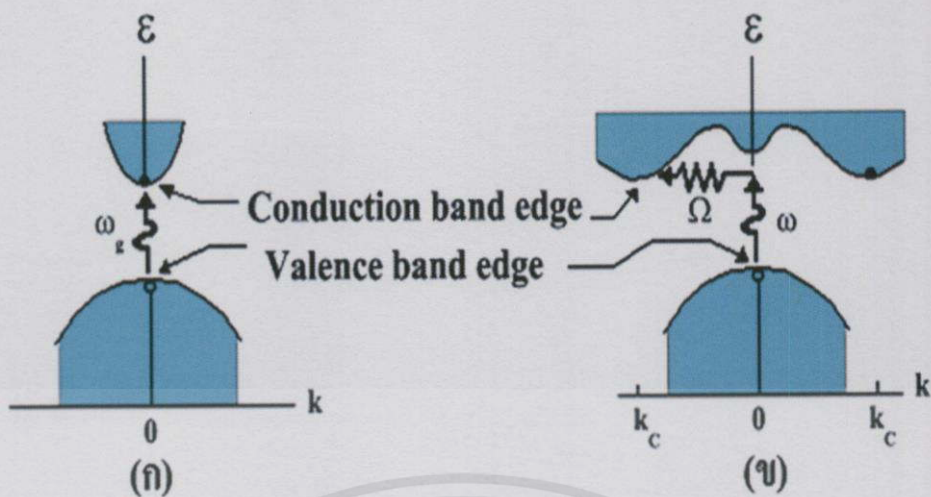
ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



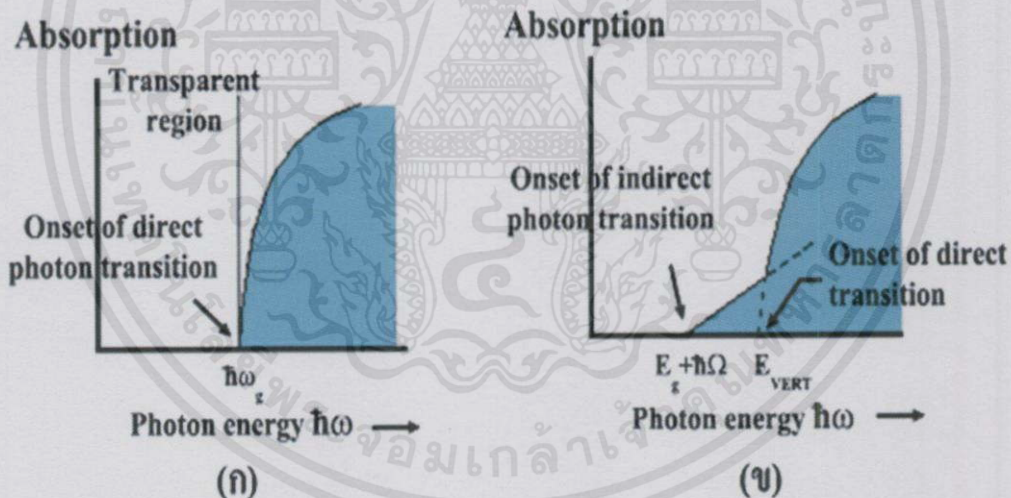
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึง: สารกึ่งตัวนำชนิดพีเอ็นทีที่มีการนำไปใช้
- ก. ฉนวน
 - ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
 - ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
 - จ. โลหะ
 - ฉ. สารกึ่งโลหะ

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เรา จะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ แล้ว อะตอมของสารเจือประพติตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้ อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดัง แสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพติตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดย ทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะ พบว่ามีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.9 (จ) และเรบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับ แถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบ ว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิ อยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะ เรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน แบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่ มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = hv$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะ พลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดัง แสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟ ตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้าง แถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่ง โมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของ ช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = hv$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มี การทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = hv$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้าย สถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = hv$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดัง แสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับ พลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

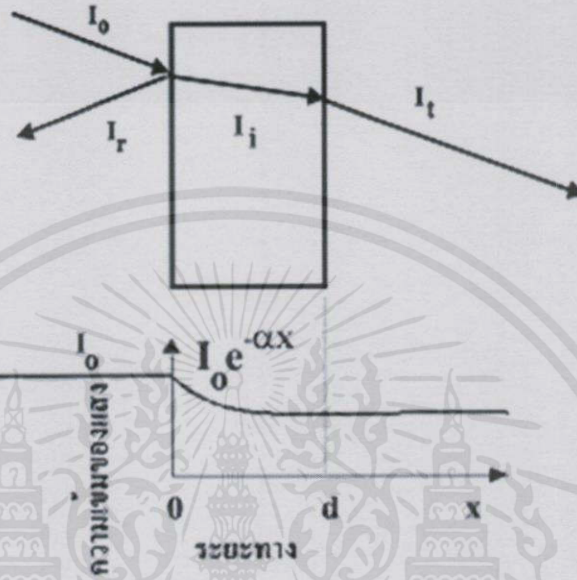


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; รัฐินัย, 2550)

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสง จะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทีมีไว้สำหรับเอาไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1-R) I_0 \quad (2.4)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.5)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.6)$$

2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งานนิตย, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.8)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
 K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)
 โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

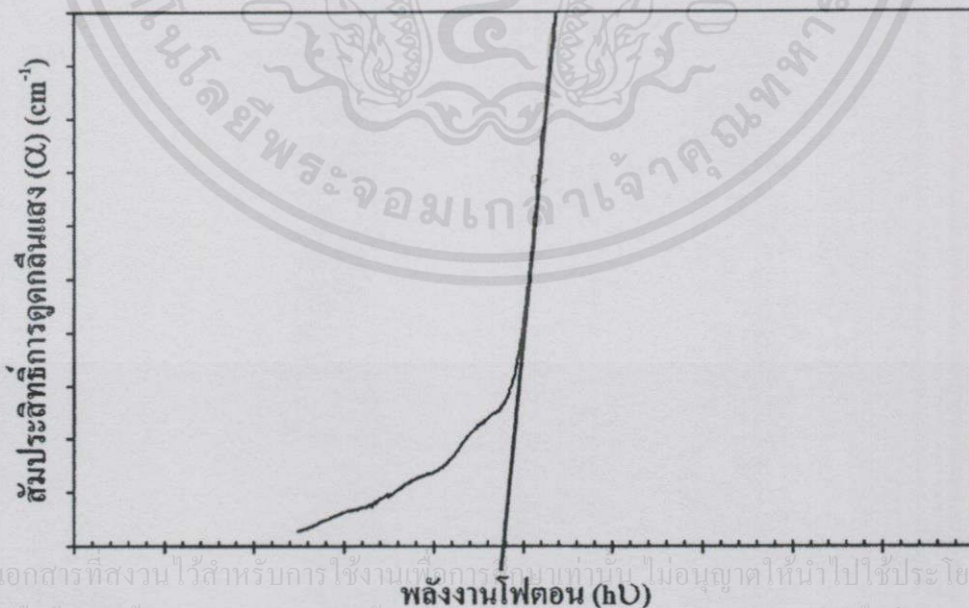
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2543; รุตินัย, 2550; Kittel, 1971)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบตั้งนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.11)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.13)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

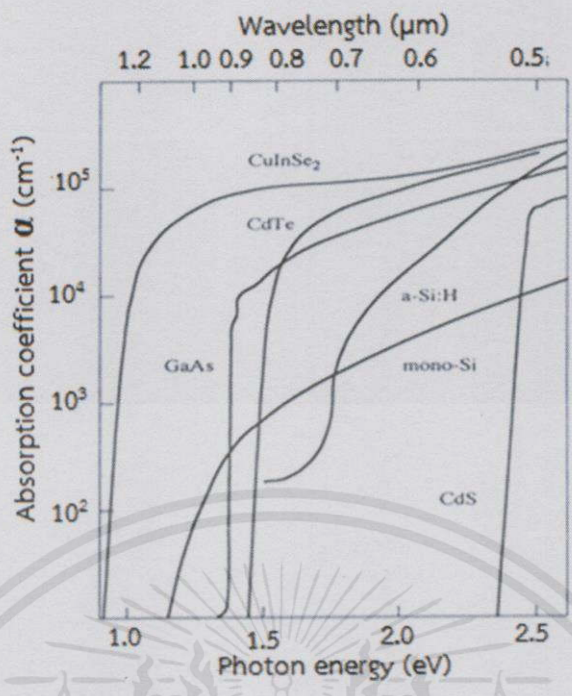
$$(\alpha hv) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

hv คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

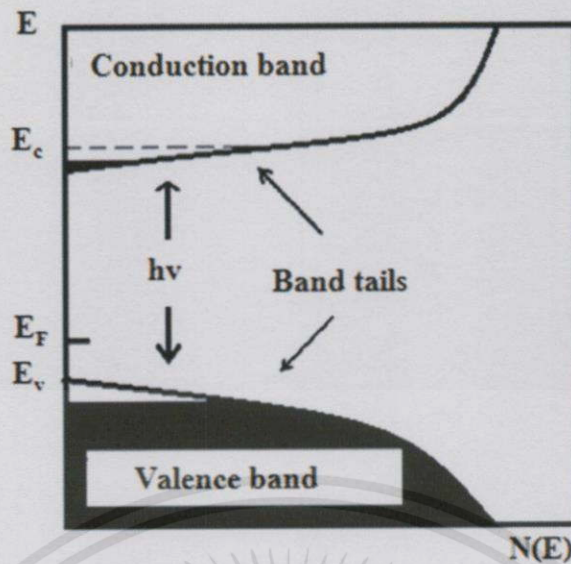


รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.4.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน (งามนิตย, 2543; ลูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของ ข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่ เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบ วาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของ สถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดัง แสดงในรูป 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.15)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือค่าความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนจากสมการที่ (2.15) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \alpha$ กับ พลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่เข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดลู่รวม

2.4.6 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) (งามนิตย, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่มีประโยชน์ต่อนักเคมีอินทรีย์คือในย่านเลขคลื่น (k) 4000-650 ต่อเซนติเมตร ถ้าคิดเป็นความยาวคลื่น (λ) จะอยู่ในช่วง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่น และ เลขคลื่น คือ

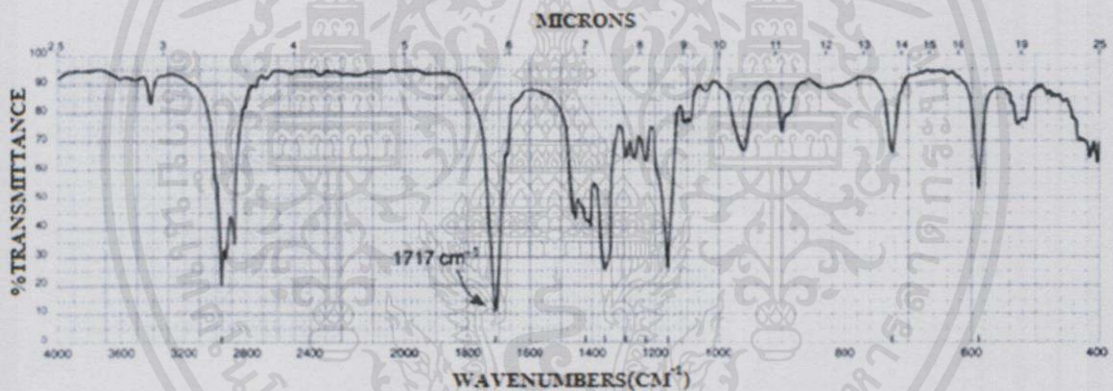
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความยาวคลื่น}(\mu\text{m}) = \frac{10,000}{\text{เลขคลื่น}(\text{cm}^{-1})} \quad (2.16)$$

สเปกตรัมอินฟราเรด เป็นการพล็อตระหว่างค่าความถี่ (เลขคลื่น, ต่อเซนติเมตร) หรือความยาวคลื่น (ไมโครเมตร) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) (รูปที่ 2.16) นิยามของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านฟิล์มบางของสารตัวอย่างกับความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง กับ ค่าความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

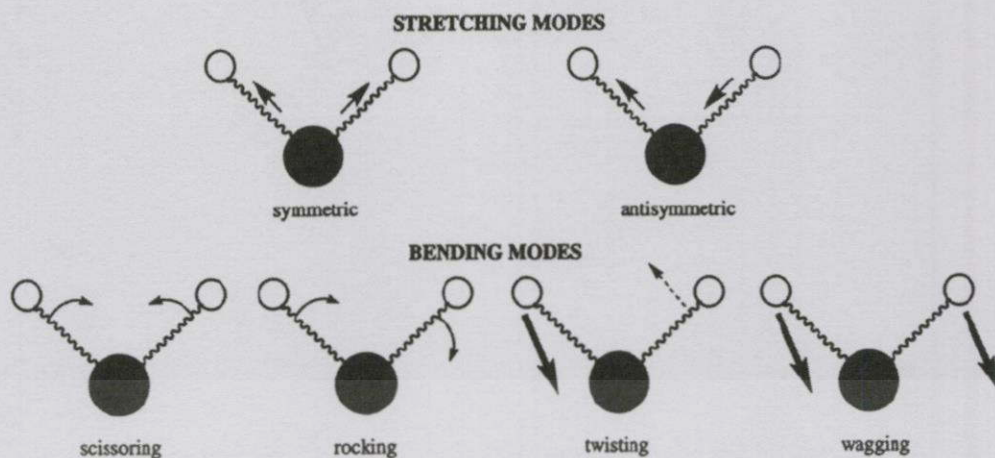
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง
 I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (quantized) กล่าวคือที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะนั้นั้น นอกจากนี้ การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้พีคใน สเปกตรัมอินฟราเรดเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electrical dipole moment) เท่านั้นที่จะมีพีคปรากฏใน สเปกตรัมอินฟราเรดตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ $C=C$ ใน $RCH=CHR$ ไม่มีพีคใน สเปกตรัมอินฟราเรด ส่วนการสั่นของพันธะ $C=O$ ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดพีคที่มีความเข้มสูงใน สเปกตรัมอินฟราเรด



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แลပ်พลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแลပ်พลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แลပ်พลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้ง อาจมีแลပ်พลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แลပ်เหล่านี้ เรียกว่า แลပ်พลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แลပ်พลังงานรวม เกิดใกล้กับแลပ်พลังงานพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแลပ်พลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของโอเวอร์โทน หรือแลပ်พลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอ์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีคทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า เฟอ์มิดับเบิล็ต (Fermi doublet) รูปที่ 2.17 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH_2

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm^{-1} (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm^{-1} (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm^{-1} (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm^{-1} (m) 1° เอมีนและเอมีต มี 2 แลပ် 3200-3400 cm^{-1} (w) 2° เอมีนและเอมีต มี 1 แลပ်
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm^{-1} อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีน
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีน
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มข้นแน่นอ่อน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH ₂ -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่ , RCH=CH ₂)

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่ , R ₂ C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมൈด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ : s = ความเข้มสูง, vs = ความเข้มสูงมาก, m = ความเข้มปานกลาง, w = ความเข้มต่ำ, vw = ความเข้มต่ำมาก, sh แหวมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก, OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย,2550; งามนิตย์,2551; จูตินัย,2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจาย

ของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.18)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.18)$$

เมื่อ $f(E)$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)
k	คือ	ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณีคือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทริสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทริสิกเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทริสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทริสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_c(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ที่อุณหภูมิใดๆคือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.19)$$

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_c(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้นอีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.20) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมี ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_t} n(E) dE = \int_0^{E_t} N_c(E) f(E) dE \quad (2.21)$$

เมื่อ E_t คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึก มากๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.21) จึงสามารถขยาย ของเขต E_t ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{3/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.22)$$

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

$$n_i = N_c \exp \left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.24)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp \left[-\frac{E_F + E_g}{kT} \right] \quad (2.25)$$

โดย

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_v คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์
เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.27)$$

และ

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.28)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2}\right) \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.28) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิคเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) และอะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.30)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.31)$$

จะได้กฎการคงตัวของมวลดังสมการ

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.32)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level: E_d) และ อะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level: E_a) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

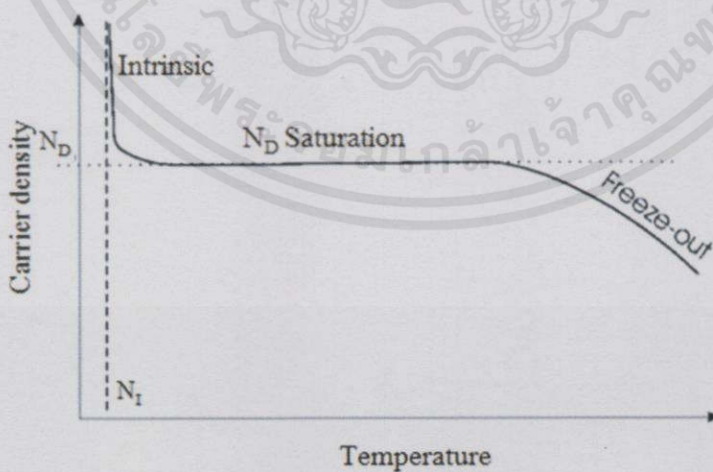
$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.33)$$

เมื่อ n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแบบลงมือทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
ชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.33) ลดรูปได้เป็น

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

จากสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.35)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.36)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิต่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.33) และ (2.34) จะกลายเป็นสมการของบริเวณย่านอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.37)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีค่าน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะช่องมาก ในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.34) จะเปลี่ยนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.38)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และ อะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.38) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.39)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{\frac{E_d + E_F}{kT}\right\}} \right] \quad (2.40)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.37), (2.38) และ (2.39) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.40) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$N_c' = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.42)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N_c') + \frac{1}{2}\left[(N_d + N_c')^2 + 4N_c'(N_d - N_a)\right]^{1/2} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N_c' จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.43) เทอมที่สองด้านขวามือ
ได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N_c'}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N_c') + \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} + \dots$$

$$n \cong \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} \quad (2.44)$$

ถ้า $N_a \gg N_c'$ สมการที่ (2.44) จะกลายเป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N_c' = 0 \quad (2.45)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_c'} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.46)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.44) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.46) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.6 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิทย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คืออัตราส่วนของ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ
 n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
 p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.48)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า $J = \frac{I}{A}$ และ $E = \frac{V}{l}$

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.49)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.50)$$

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

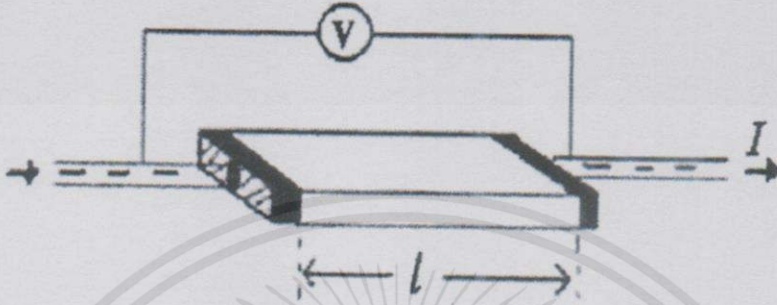
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่นแท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง

ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและ ศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.51)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.52)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึง องค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้า และออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่ง ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาด ของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึง แก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัด ศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลด ความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

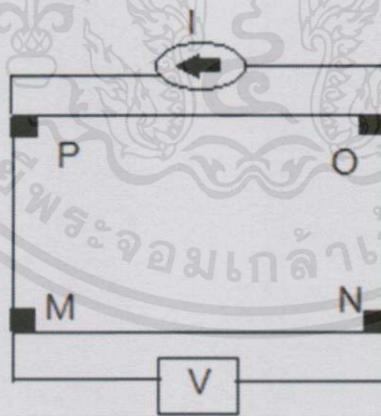
1.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความ
ไม่ว่าการตีพิมพ์หรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
ต่างก็ยกย่องคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.53) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.53)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.54)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.54)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.55)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.56)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.57)$$

2.8 ปปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1957; Elandovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $\rho = \frac{1}{pe\mu_p}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.59) การคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.60)$$

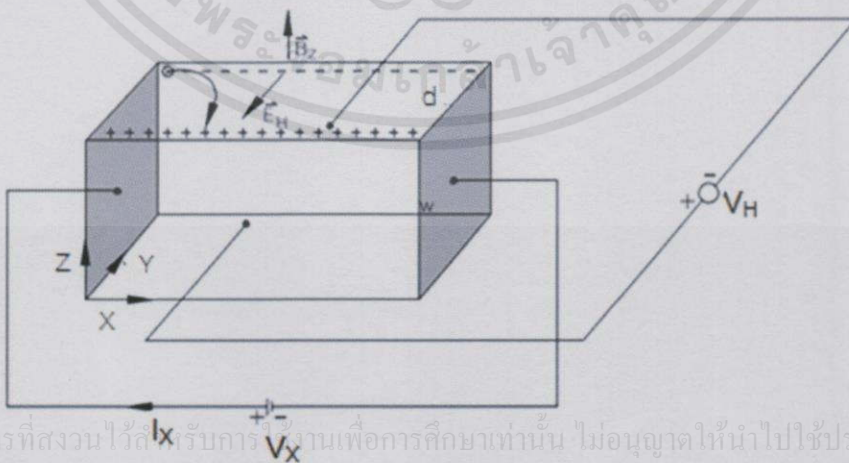
เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือ ความหนาแน่นของโฮล
 n_e และ n_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.61)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.62)$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรับการอ้างอิงเพื่อการศึกษานั่น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า" ไม่ว่าจะผิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.63)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.63)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = qnv_x(wd) \quad (2.64)$$

$$\text{จากกฎของโอห์ม} \quad V = IR \quad (2.65)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.66)$$

$$\text{จากรูปที่ 2.22} \quad A = w \cdot d \quad (2.67)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.64) และ (2.65) และ (2.67)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.68)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall Voltage : V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.69)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$\text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน} \quad E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad \text{ภาคให้นำไปใช้ประโยชน์} \quad (2.70) \quad \text{การคำนวณ} \quad \text{ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น} \quad \text{อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้}$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.70) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.71)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.72)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.73)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.74)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.75)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.76)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.77)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.78)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.79)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยาม ค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดัง

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.80)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.81)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่ จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.82)$$

หรือจากสมการที่ (2.74) และ (2.79)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.83)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า

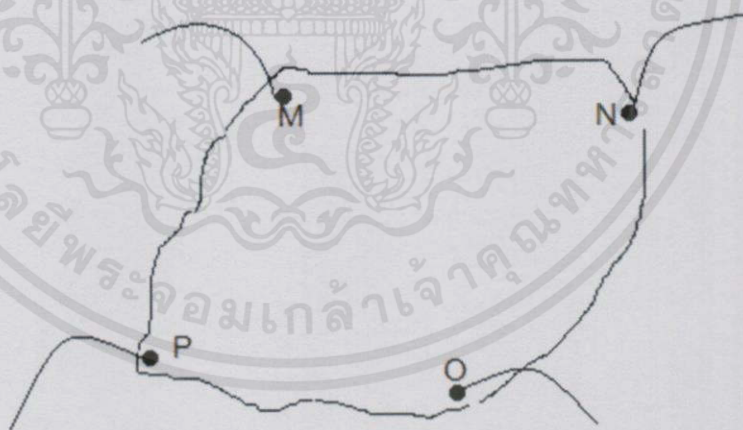
r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาทะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาทะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; วีรชัย, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สุกฤษฎ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1993; van der pauw, 1958; Tilley, 2004; Caballero, 2003)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สำคัญสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.84)$$

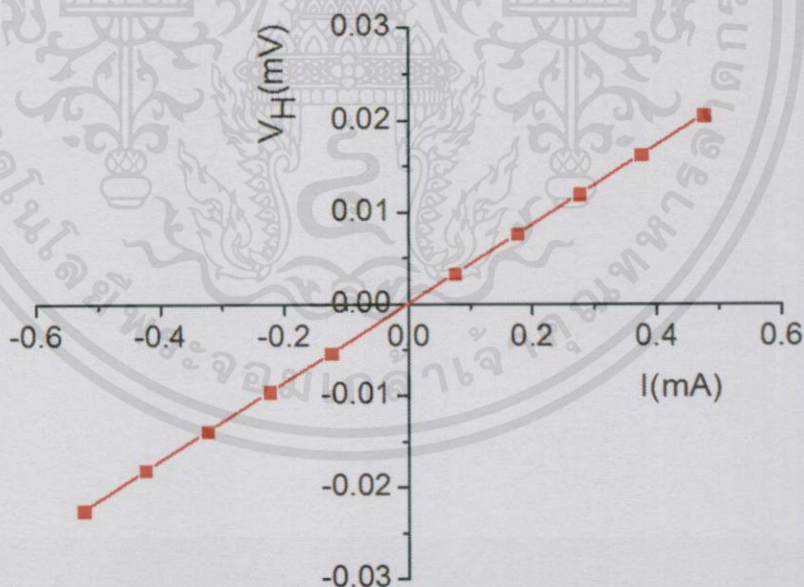
สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.85)$$

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

จากสมการที่ (2.84) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.86)$$



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ของศูนย์บริการลูกค้า

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.24 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$

สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.87)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.88)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

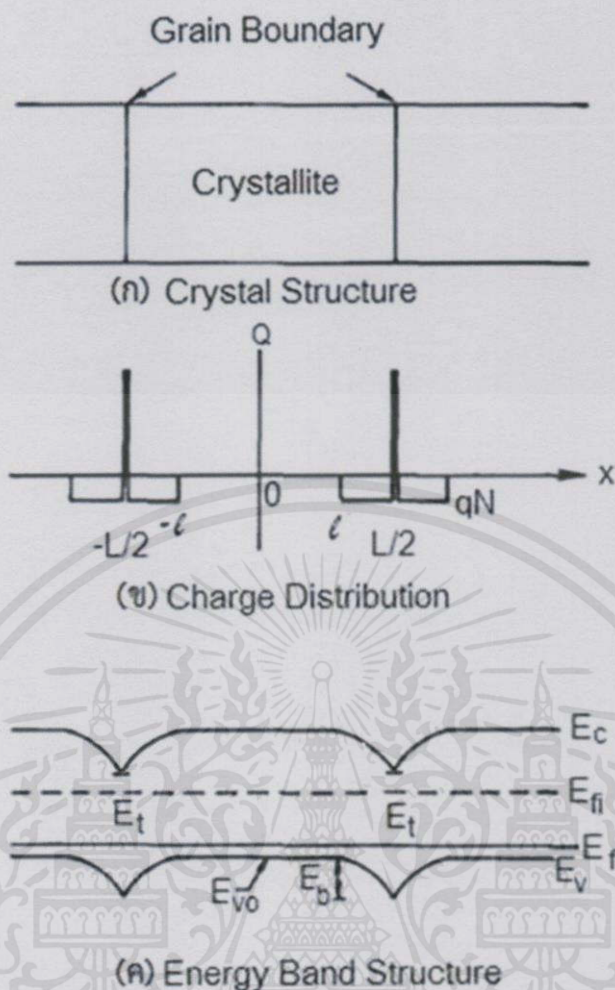
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิทย์, 2545; ฐิตินัย,2549; ฐิตินัย,2550; งามนิทย์,2551; ฐิตินัย,2551)

ซีโต (Seto,1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนรวมกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยวสามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเกรน
5. ข้อบกพร่องผลึกถือว่าเป็นกับดักพาหะที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้ว กับดักพาหะกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักพาหะมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักพาหะจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักพาหะจะเป็นผู้ให้ (donor)
7. ระดับพลังงานของกับดักพาหะ (E_t) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน
8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



- รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ
- ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
 - การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
 - โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด หรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ (N_a^*) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนเอกสารจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มิ (E_f) จะอยู่ระดับการก้ำไม่ต่ำกว่า E_c สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.89)$$

เมื่อ
$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.90)$$

และ
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.91)$$

สมการที่ (2.90) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.92)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.93)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.94)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.95)$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.96)$$

โดยที่ E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Serin et al. 2011) สำหรับ ค่าความหนาแน่นของกักพาหะ N_i สามารถหาได้จากสมการที่ (2.88) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.97)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.98)$$

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ(E_g) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.99)$$

2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วน ยิ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_F - E_t - E_b \gg kT$ สภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.100)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.100) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.101)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.102)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.103)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต่อความชัน = $-\frac{E_a}{1,000k}$ อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (2.104)

$$E_a = -\frac{1,000(k)(\text{ความชื้น})}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.105)$$

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (2.106)$$

เมื่อ ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Serin et al. 2011) จากสมการที่ (2.105) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.105) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

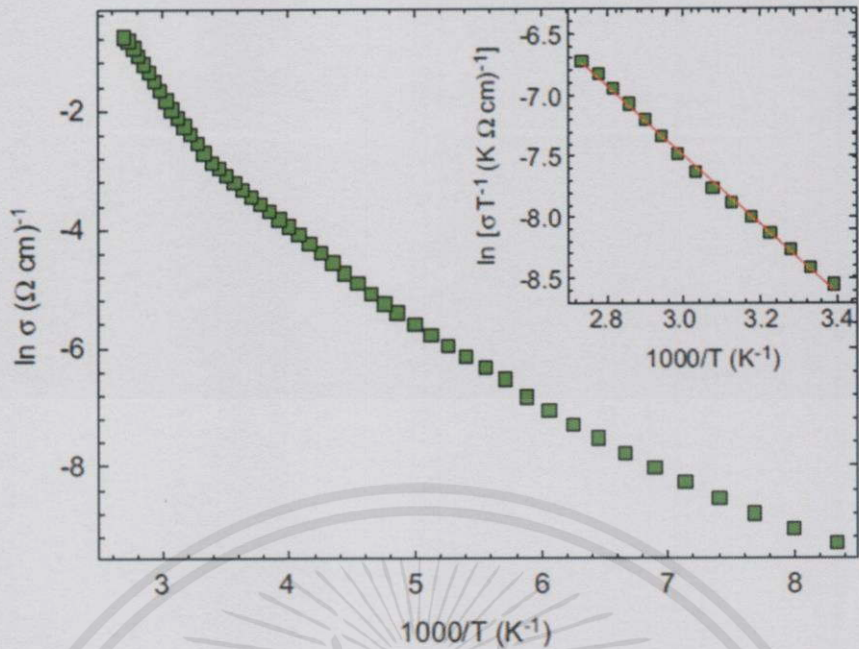
สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_F + E_t - E_b \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) แสดงว่ากับดักพาหะบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้านั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\sigma = e N_c^2 L v_c (2 \epsilon_s N_a^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (k T N_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.108)$$

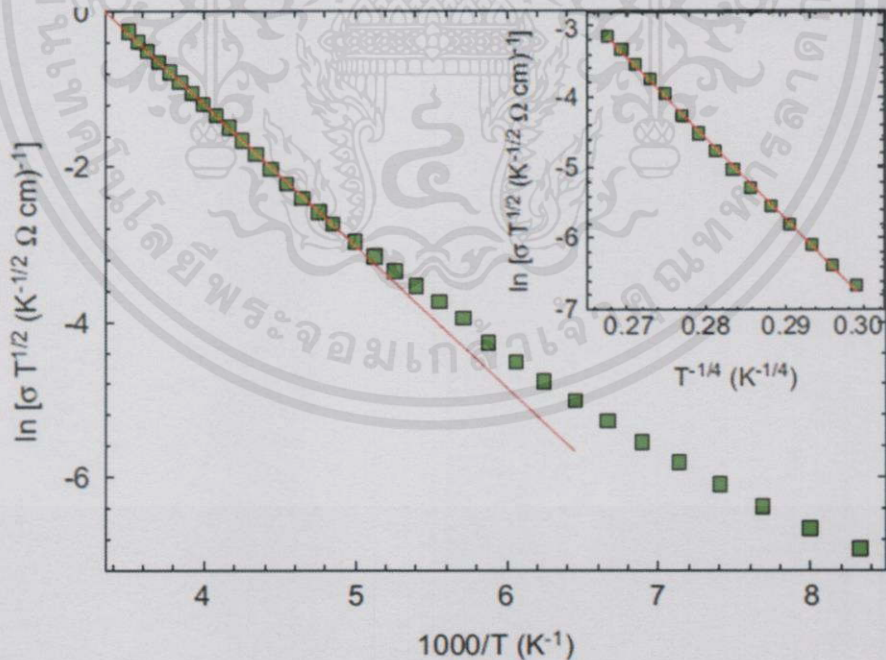
ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.109)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al. 2011)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{\frac{-1}{4}}$

2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย์, 2555; จูตินัย, 2556)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.110)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.111)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln\sigma_0 \quad (2.112)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)
 k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
 T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.111) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ $-\left(T_0\right)^{\frac{1}{4}}$
 ส่วน ค่า $\ln\sigma_0$ คือจุดตัดแกน $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$ ที่จุด $T^{-\frac{1}{4}} = 0$ โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi a k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $T_0 = \frac{18a^3}{kN(E_F)}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ v คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิรตซ์

$N(E_F)$	คือ	ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)
α	คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)
e	คือ	ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
T_0	คือ	องศาของความไม่เป็นระเบียบ (Degree of disorder)

จากสมการที่ (2.122) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.115)$$

เอาสมการที่ (2.122) คูณกับสมการที่ (2.124) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.116)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.117)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.118)$$

เมื่อค่าความถี่โฟนอน $\nu = 1 \times 10^{13}$ เฮิร์ตซ์ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.119)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.118) ลงในสมการที่ (2.117) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^{\frac{3}{2}} k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.120)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.121)$$

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

และ ค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.122)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.123)$$

เมื่อทราบค่า $N(E_F)$ และ N_a เราสามารถที่จะคำนวณหาค่า N_d ได้จากความสัมพันธ์

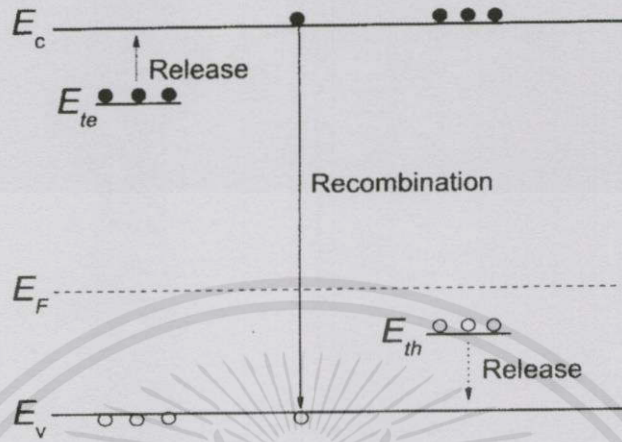
$$N(E_F) = \left(\frac{2\epsilon_s}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.124)$$

โดยที่ N_d คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน $\frac{N_d}{N_a} = k$ และ $k < 1$ เสมอ

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อน (งามนิตย, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มี การฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่กับกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการ

รวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาซ้ำมาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.28 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.125)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\zeta$ และ $\zeta = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.126)$$

แทนสมการที่ (2.124) ลงในสมการที่ (2.125) จะได้

$$I = en\mu n_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.127)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของเอกสารพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

ไม่ว่ากรณีใดก็ตามเมื่อให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.128)$$

แทนสมการที่ (2.126) ลงในสมการที่ (2.127) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.129)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.130)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.131)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.134) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) (nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_{ii} V_a \quad (2.132)$$

เมื่อ σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.133)$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.134)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งาน หากต้องการนำภาพไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาวิจัยใดๆ กรุณาติดต่อขอสงวนสิทธิ์ในการนำภาพไปใช้

โดยที่

V_a	คือ	แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
w	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
l	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
d	คือ	ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
τ_r	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
N_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
σ_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาช่วยด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.135)$$

$$\ln \tau_r = \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) = \ln \tau_{ro} + \frac{E_t}{(1,000k)}\left(\frac{1,000}{T}\right)$$

เมื่อ

$$\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

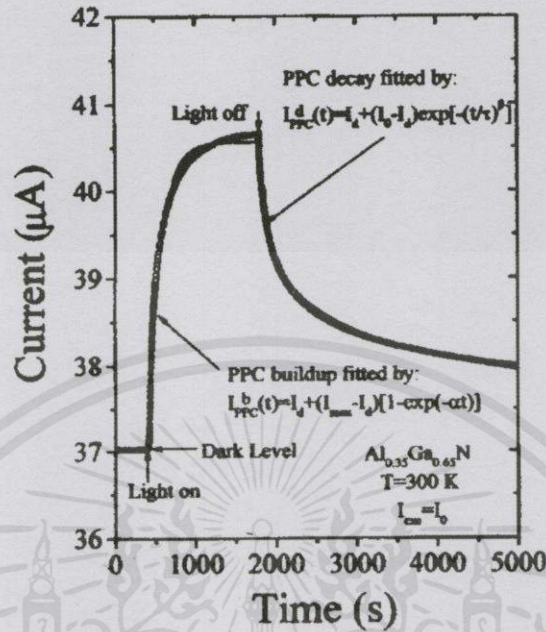
$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} = (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.136)$$

ในการศึกษาพลาสมาไฟฟ้าเชิงแสงต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.137)$$

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o' \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.138)$$



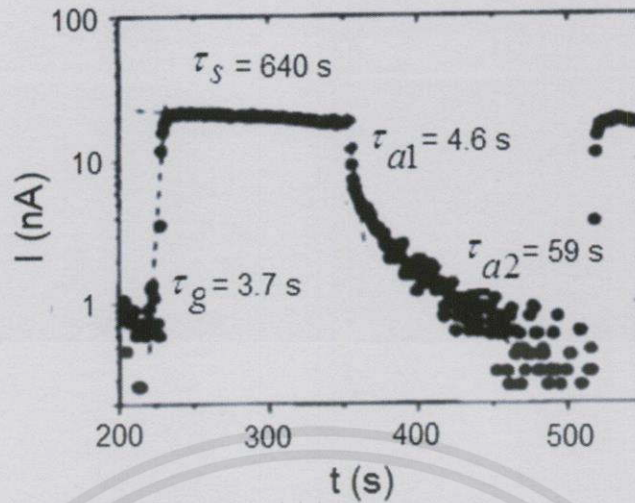
รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลงของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ออร์ัน

จากสมการที่ (2.136) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o' - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.139)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตชาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตชาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.30) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อื่น ทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้น กระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.132) และสมการที่ (2.136) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.140)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.139) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.141)$$

จากสมการที่ (2.140) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{n2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.141) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.142)$$

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.143)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.144)$$

และ

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.145)$$

สมการที่ (2.140) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.146)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลอง และ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right] \quad (2.147)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโตะขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.128) และ (2.140) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n1} \exp\left(-\frac{t}{t_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n2} \exp\left[-\left(\frac{t}{t_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.148)$$

จากสมการที่ (2.147) สามารถที่จะหาค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหานี้ไปเผยแพร่หรือใช้เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.149)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d2} \right) \quad (2.150)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับจะได้ว่า

$$N_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.151)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.152)$$

สมการที่ (2.147) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$\left| I_p \right| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1} \right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2} \right)^\beta \right] \quad (2.153)$$

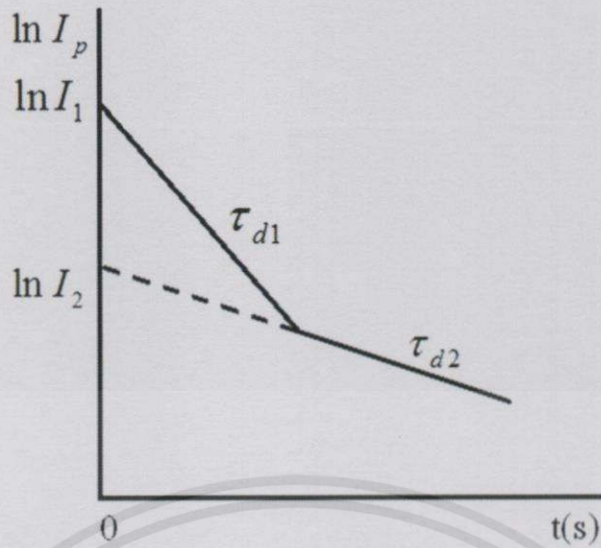
ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$\left| I_p \right| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1} \right) \right] + A_2''' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{d2} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.154)$$

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.155)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.156)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$ ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.157)$$

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.158)

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชิ้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

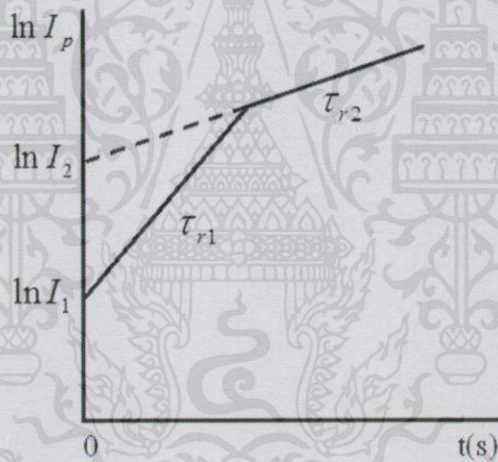
$$N_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.159)$$

และ

$$N_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.160)$$

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

กระแสชาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.161)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)$$

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -t/\tau_r \quad (2.162)$$

จากสูตร $\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$

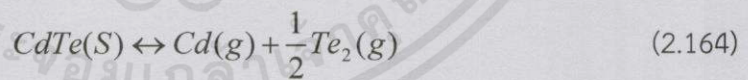
ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.162) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.163)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.162) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.156), (2.158), (2.159) และ (2.160) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Spaced Sublimation: CSS) (ฐิตินัย, 2556)

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลื่อนต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right) = K_p(T) \quad (2.165)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$

คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.166)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ $\Delta G_{CdTe} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T$ กิโลแคลอรีต่อโมล

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ (T_{SO}) และแผ่นฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ (T_{sub}) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{SO}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{SO}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{SO}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{SO}}\right] \quad (2.167)$$

$$K_p(T_{sub}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{sub}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{sub}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}}\right] \quad (2.168)$$

พลັกซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd และโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของ Fick (Fick's first law)

$$J_{Cd,j} = \frac{D_{Cd,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Cd}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv J \quad (2.169)$$

$$J_{Te_2,j} = \frac{D_{Te_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Te_2}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.170)$$

เมื่อ $J_{Cd,j}$ คือ พลັกซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j

$J_{Te_2,j}$ คือ พลັกซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j

J คือ พลັกซ์ของการแพร่

$D_{i,j}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

ซึ่งในกรณีนี้หนาโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่าอะตอมของธาตุ Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{Cd,j} = 1.85 D_{Te_2,j}$ ในบรรยากาศของแก๊ส H_2 , He หรือ Ar จากสมการการส่งผ่านโมเลกุลของ $CdTe$ ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{so}) มีค่าต่างกัน $T_{SO} - T_{sub} = 70$ องศาเซลเซียส จะได้ $P_{Cd}(T_{SO}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$ และ $P_{Te_2}(T_{SO}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$ ดังนั้นจึงสามารถ

เขียนสมการใหม่ได้เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{P_{Te_2}(T_{SO})} = \frac{2D_{Te_2}J}{D_{Cd}j} = 1.1 \quad (2.171)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการที่ (2.166), (2.167), (2.168), (2.169), (2.170) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR\left(\frac{\mu m}{min}\right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.172)$$

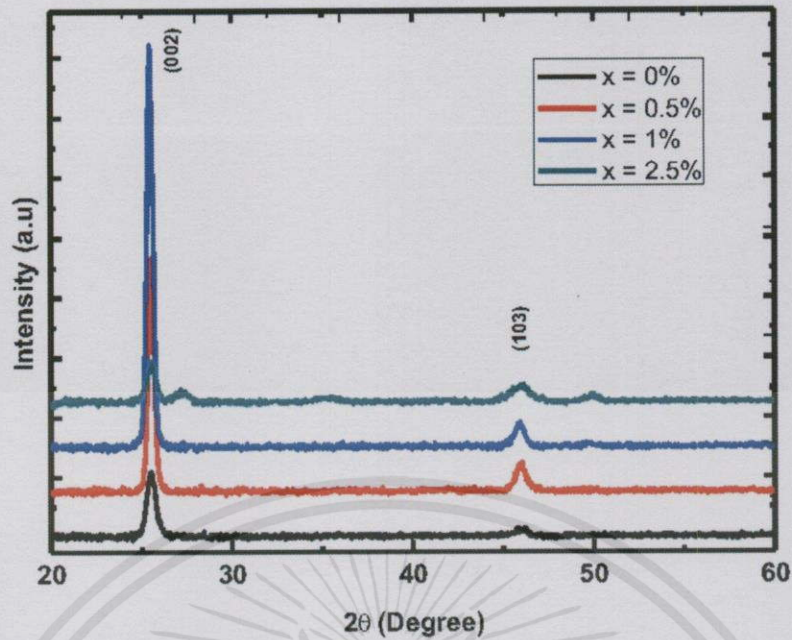
เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่
 M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe
 ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Mazhar, 2013; Acharya, 2010; Vishwakarma, 2013)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

มาซาร์และคณะ (Mazhar, 2013) ได้วิจัยเรื่องสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยเทคนิคการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ได้ผลการศึกษา XRD แสดงลักษณะสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ ตรงกับระนาบผลึก (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้นเป็น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของระนาบ (002) มีลักษณะโตขึ้น และหลังจากนั้นพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) จะลดลง ดังรูปที่ 2.33

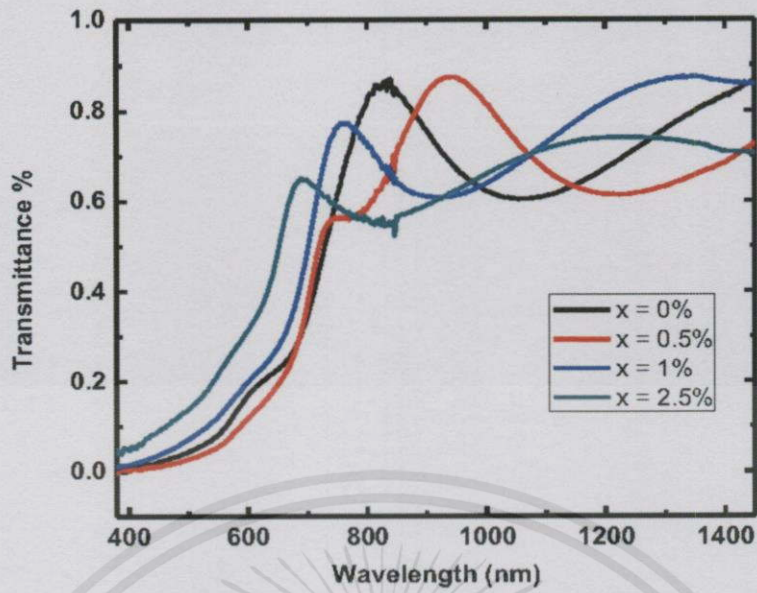
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



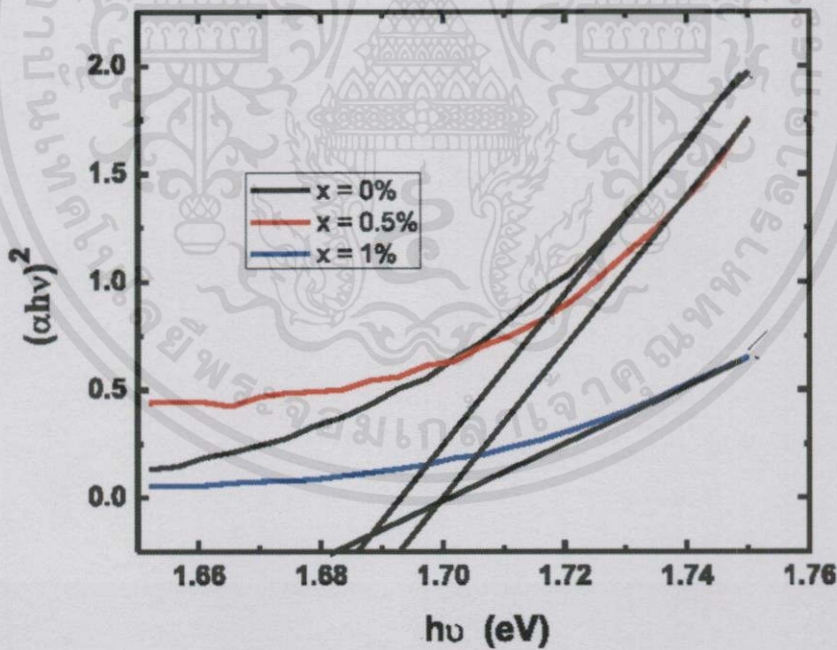
รูปที่ 2.33 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ($x=0\%$, 0.5% , 1% , 2.5%)

และได้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงซึ่งสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ดังแสดงในรูปที่ 2.34 พบขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นสั้นลงและการส่งผ่านทางแสงลดลงตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในรูปที่ 2.35 พบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็น 1.685, 1.695 และ 1.680 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ที่เพิ่มขึ้น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



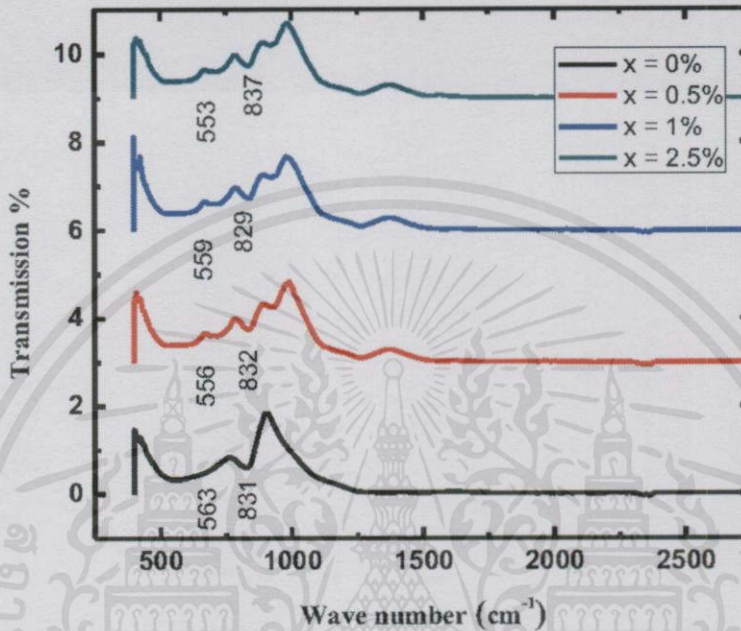
รูปที่ 2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb



รูปที่ 2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา FTIR ดังรูปที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยวาดกราฟระหว่าง เปอร์เซนต์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

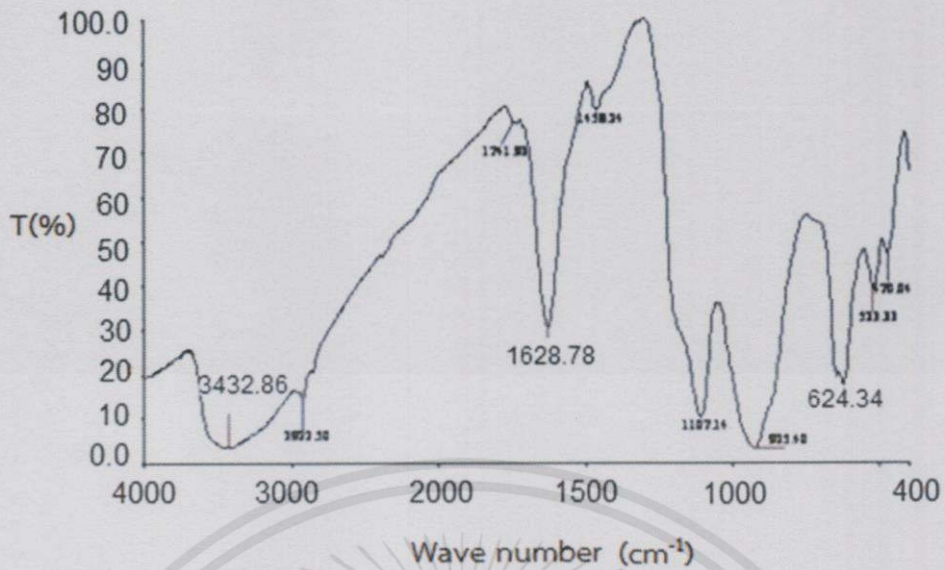
ทางแสง กับ เลขคลื่นอยู่ในช่วง 250-2750 ต่อเซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงปรากฏที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 563 ต่อเซนติเมตร ถูกยืนยันการมีอยู่ของการสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบโมเลกุล CdSe ซึ่งโหมดการสั่นอยู่ในช่วงค่าเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

อะชายะและคณะ (Acharya, 2010) ได้ศึกษาสเปกตรัม FTIR ที่มีค่าเลขคลื่นอยู่ในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยการสังเคราะห์จากสารละลายเคมี เกิดพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 624.34 ต่อเซนติเมตร เนื่องมาจากความถี่ในโหมดของการยืดของพันธะ Cd-Se อีกทั้งยังได้แสดงพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 3432.86 ต่อเซนติเมตร และ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงค่าเลขคลื่นเท่ากับ 1628.78 ต่อเซนติเมตร ซึ่งมาจากโหมดการยืดของ O-H และการงอของ O-H ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.37

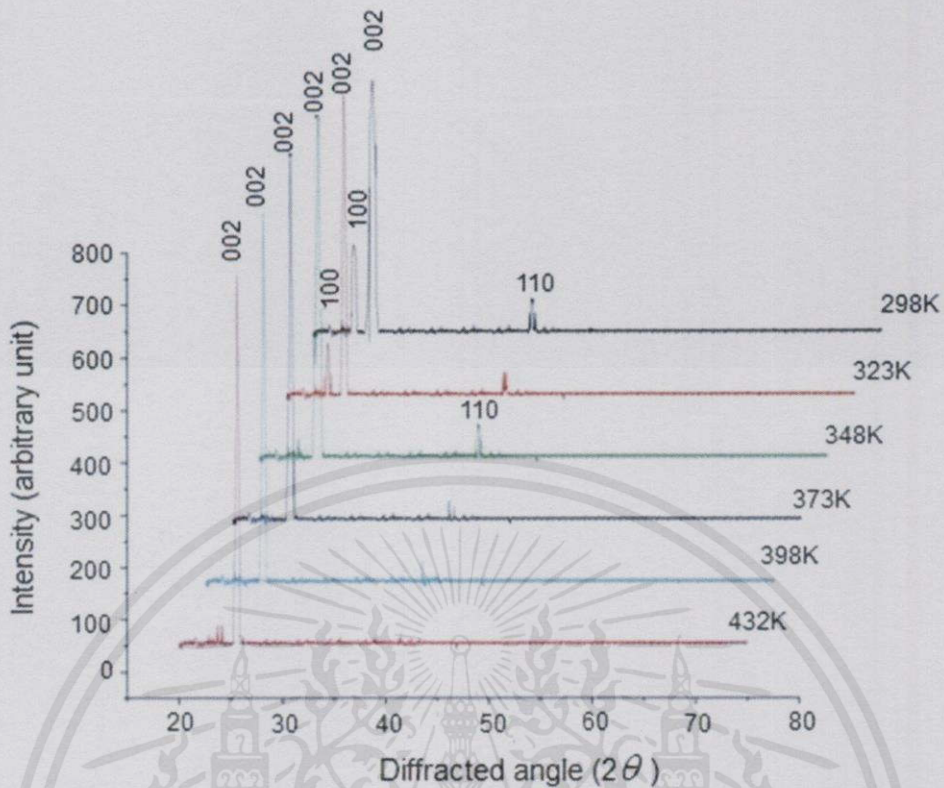
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe

วิชาวคาร์มา และผู้ร่วมงาน (Vishwakarma, 2013) ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิต่างๆ รูปที่ 2.38 แสดงพีคความเข้มสูงสุดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อยู่ที่ระนาบ (002) ส่วนพีคความเข้มของระนาบ (100) และ (110) มีค่าต่ำ พีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เหล่านี้สอดคล้องดีกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยความเข้มพีคของระนาบ (002) เพิ่มขึ้นแต่ความเข้มพีคของระนาบ (100) และ (110) จะลดลง ตามอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เพิ่มขึ้นจนถึง 348 เคลวิน จากการสังเกตฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทั้งหมดบ่งบอกว่าระนาบ (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation)

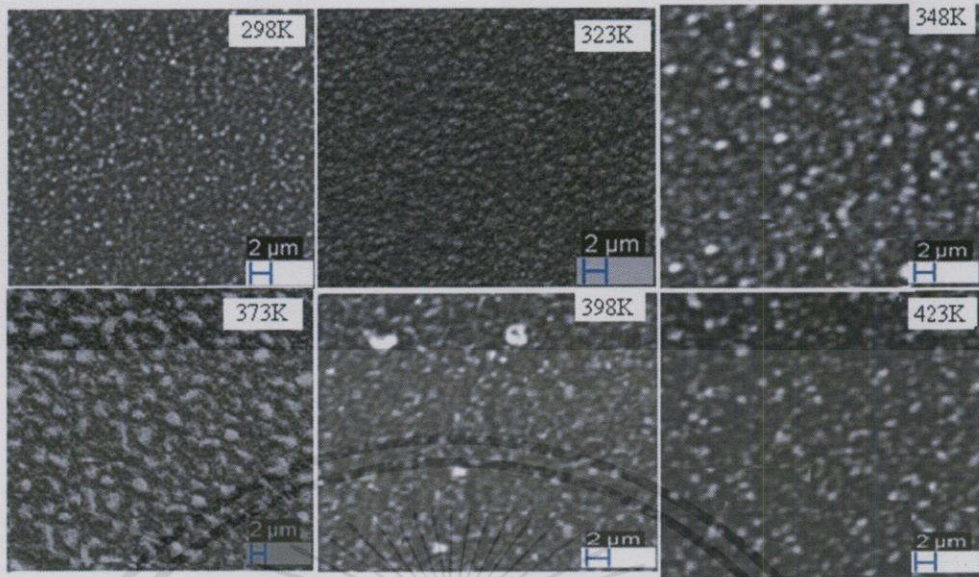
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

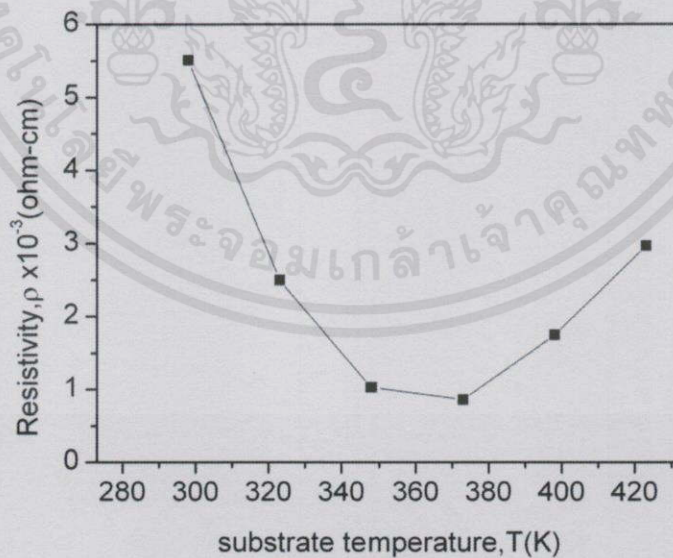
ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็น (n-type) ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิในช่วง 298-437 เคลวิน จะแสดงในรูปที่ 2.39 พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เคลือบติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดี ผิวหน้าเรียบเสมอกัน มีความเป็นเนื้อเดียวกันปราศจากข้อบกพร่องผลึก เช่น หลุมเล็กๆ และรอยแตก ขนาดเกรนของผลึกจะโตขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 แสดงภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

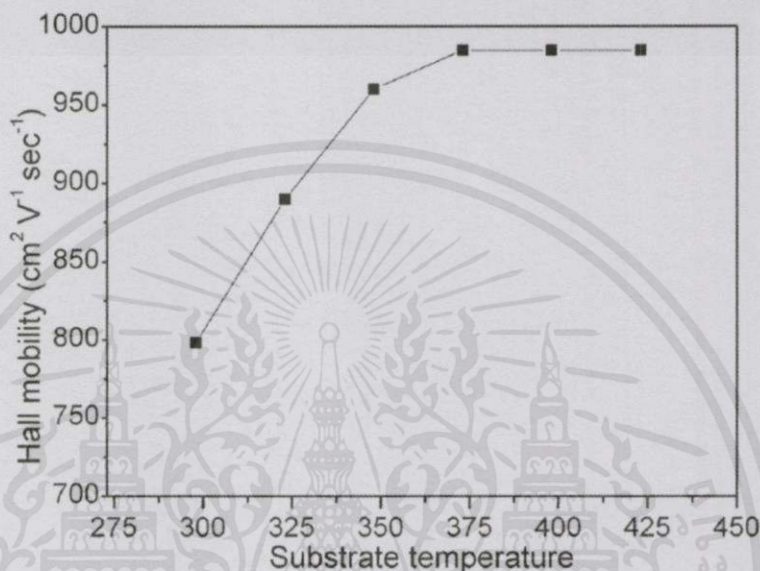
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงดังรูปที่ 2.40 ค่าสภาพต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วจาก 5.5×10^{-3} เป็น 0.86×10^{-3} โอห์ม·เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน หลังจากนั้นค่าสภาพต้านทานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



เอกสารนี้รูปที่ 2.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีทรัพย์สินทางปัญญาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

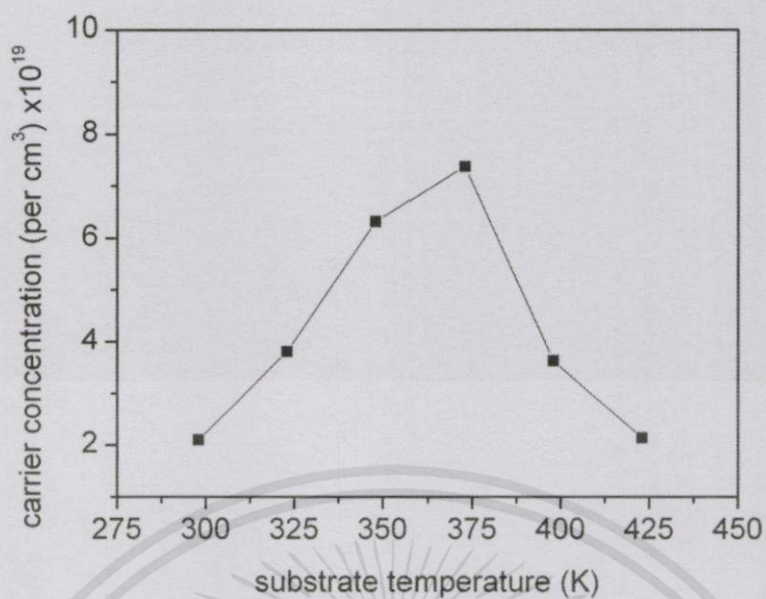
การลดลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 298– 373 เคลวิน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของค่าความหนาแน่นของพาหะและการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพคล่องฮอลล์ของประจุพาหะ หมายถึง เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 398-423 เคลวิน เนื่องจากการลดลงของนอน-สโตยติโอเตตรี (non-stoichiometry) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงการนำไฟฟ้าชนิด n-type เนื่องจากการเกิดนอน-สโตยติโอเตตรี คือ เกิดอะตอมของ Se หายไป (Se vacancies) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.41 แสดงค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของสภาพคล่องฮอลล์ตามอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.41 ค่าสภาพคล่องของพาหะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน และหลังจากนั้นจะเกิดการอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากการลดลงของการกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรน (grain boundary-scattering) การกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนของประจุพาหะขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของเกรน กล่าวคือ การกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนสูง (high grain boundary-scattering) เกิดจากขนาดผลึกที่มีขนาดเล็ก ส่วนการกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนต่ำ (low grain boundary-scattering) เกิดจากขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่ ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงดังรูปที่ 2.42 พบว่าความเข้มข้นของพาหะเพิ่มขึ้นจาก 2.10×10^{19} เป็น 7.38×10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฐานรองรับ และหลังจากนั้นความเข้มข้นของพาหะจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก การเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นของพาหะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเป็นนอน-สโตยติโอเตตรี (non-stoichiometry) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 แสดงค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
7. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซีโตนและ เอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิหือ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทิ้งสแตน 1,000 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมซีลีไนด์และอินเดียมซัลไฟด์ บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งหือ Sartorius
4. ปากคืบ
5. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
6. แวนตากรองแสง
7. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้
8. ครกบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าดัน 30 กิโลโวลต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. กาวเงินนำไฟฟ้า
6. สายไฟ
7. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอตประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
5. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
6. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

7. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
8. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วแล้วเปิดปั๊มดูดอากาศออกจนกระทั่งมีความดันประมาณ 5×10^{-2} มิลลิบาร์
4. ทำความสะอาดท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เชย้าทำความสะอาดสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
5. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยอะซิโตน

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, Se, In และ S มีค่าเท่ากับ 112.41, 78.96, 114.82 และ 32.06 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdSe} = 112.41 + 78.96 = 191.37 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = (2 \times 114.82) + (3 \times 32.06) = 325.82 \text{ กรัมต่อโมล}$$

กรณี $x = 0.01$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= [0.99 \times (112.41 + 78.96)] + [0.01 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 192.7145 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

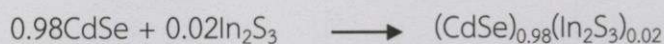
ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.99 \times 191.37}{192.7145} \right) = 0.9831 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left(\frac{0.01 \times 325.82}{192.7145} \right) = 0.0169 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x = 0.02$



มวลโมเลกุลของสารประกอบได้เท่ากับ

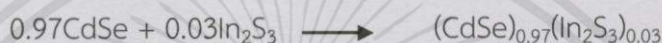
$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.98}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.02} &= [0.98 \times (112.41 + 78.96)] + [0.02 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 194.0590 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.98 \times 191.37}{194.0590} \right) = 0.9664 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left(\frac{0.98 \times 325.82}{194.0590} \right) = 0.0334 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.03$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

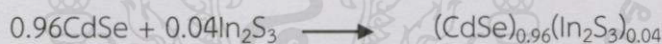
$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.97}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.03} &= [0.97 \times (112.41 + 78.96)] + [0.03 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 195.4035 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.03 \times 191.37}{195.4035} \right) = 0.9499 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left(\frac{0.97 \times 325.82}{195.4035} \right) = 0.0500 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.04$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

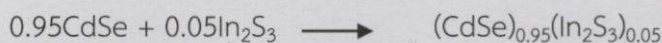
$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.96}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.04} &= [0.96 \times (112.41 + 78.96)] + [0.04 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 196.7480 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.96 \times 191.37}{196.748} \right) = 0.9338 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left(\frac{0.04 \times 325.82}{196.748} \right) = 0.0662 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.05$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.95}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.05} &= [0.95 \times (112.41 + 78.96)] + [0.05 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 198.0925 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.96 \times 191.37}{198.0925} \right) = 0.9178 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left(\frac{0.04 \times 325.82}{198.0925} \right) = 0.0822 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 และ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 5 นาที

Mole Fraction (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	In_2S_3	CdSe		
0.00	-	1.0000	650	590
0.01	0.0169	0.9831	650	590
0.02	0.0336	0.9664	650	590
0.03	0.0500	0.9499	650	590
0.04	0.0662	0.9338	650	590
0.05	0.0822	0.9178	650	590

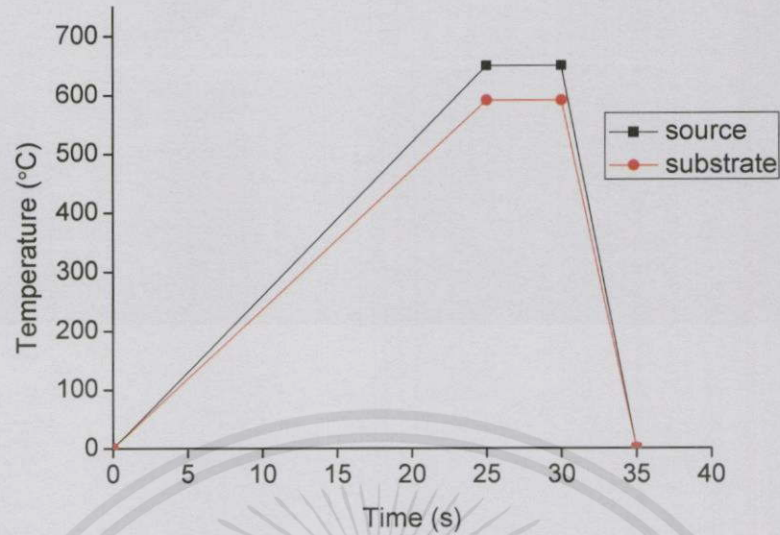
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 3 นาที

5. นำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออก จนได้ความดันประมาณ 5×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงมาต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิจากสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิจากห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนจากนั้นก็นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไปเก็บในหม้อดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอุณหภูมิ กับ เวลาที่ใช้ ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที



รูปที่ 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20–70 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 5000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 200 ถึง 1000 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

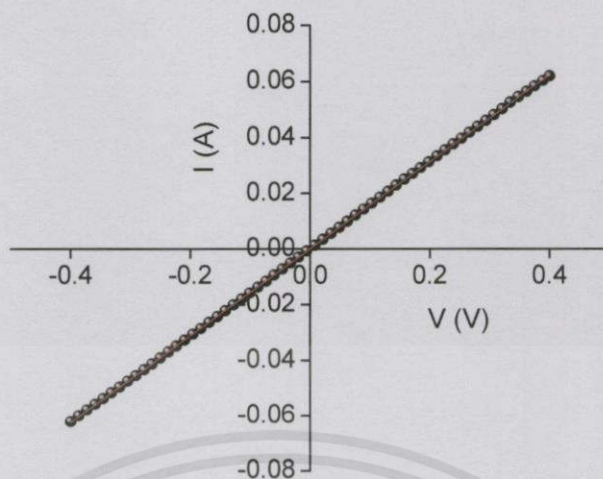
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรังสี

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างอย่างเรียบร้อย

1. ต่อวงจรและใช้โปรแกรมร่วมด้วย โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้ มีด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

3. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

$$R_{sh} = R \frac{w}{l}$$

เมื่อ R คือ ค่าความชันกราฟ

w คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

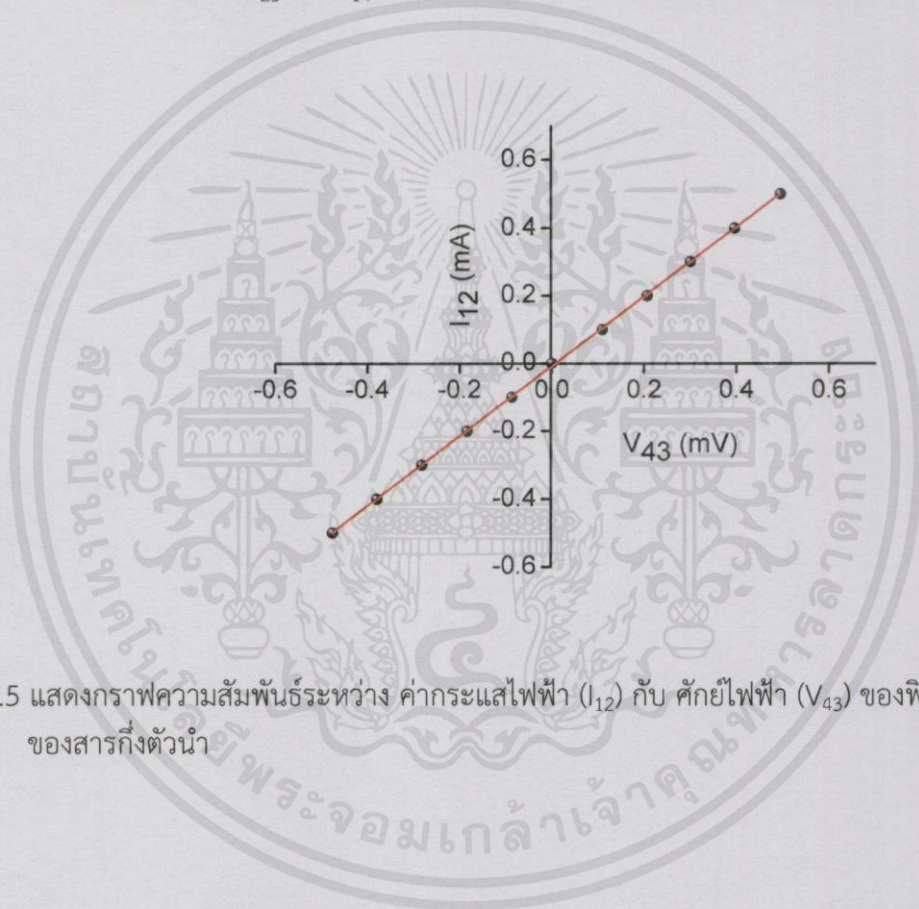
จากหลักการแวนเดอร์เพาว์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

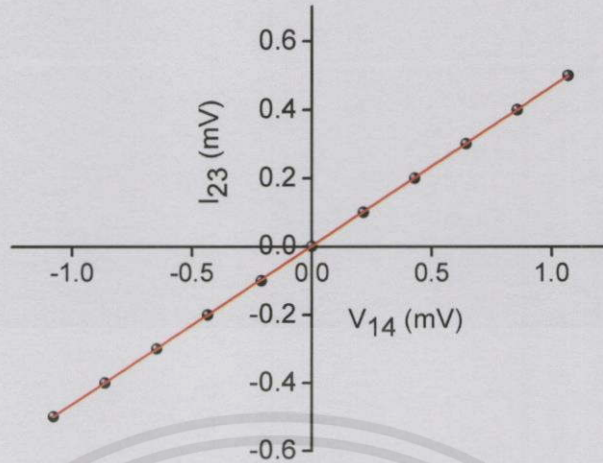
ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างอย่างเรียบร้อยโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์ จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดย ทำการวัดความต่างศักย์ V_{43} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
2. ทำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นจ่ายกระแสทางขั้ว 2 และออกทางขั้ว 3 โดย ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{14} แทน
3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I_{12} กับ V_{43} และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I_{23} กับ V_{14} แล้วคำนวณหาค่าความชันของทั้ง 2 กราฟจะได้ R_1 และ R_2



รูปที่ 3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

4. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

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

เมื่อ

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

5. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากสูตร

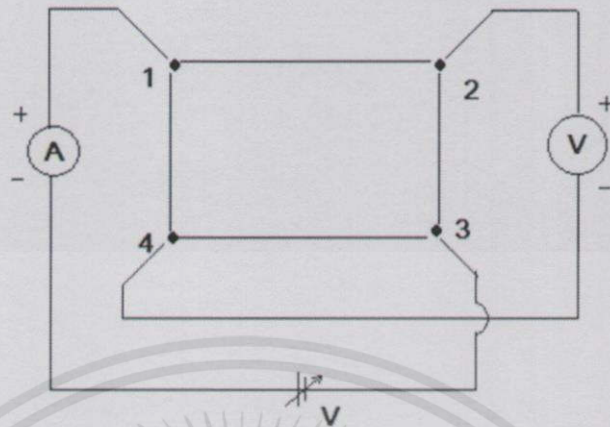
$$\rho = R_{sh} d$$

เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 5×10^{-5} เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

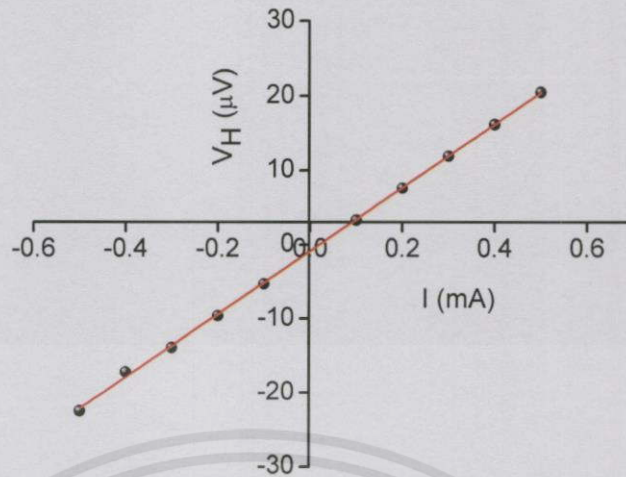
ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

1. ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B=0$) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{24} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
2. นำตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก ($B \neq 0$) ความต่างศักย์ V_{24} ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้จะเรียกว่า V'_{24} เนื่องจากมีผลจากความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ V_H เข้ามาเกี่ยวข้องจ่ายกระแส ($I = -0.6$ ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ V'_{24}
3. ความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H = V'_{24} - V_{24}$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V โดยแกน y เป็น V_H และแกน x เป็น I แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ จากสูตร

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

เมื่อ $\frac{V_H}{I}$ คือ ค่าความชันของกราฟ

B คือ สนามแม่เหล็ก มีค่า 4600 เกาส์

d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่า 5×10^{-5} เซนติเมตร

5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ (n) จากสูตร

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

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} คูโลมบ์

6. คำนวณหาค่าสภาพคล่องของฮอลล์ (μ_H) จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

บทที่ 4

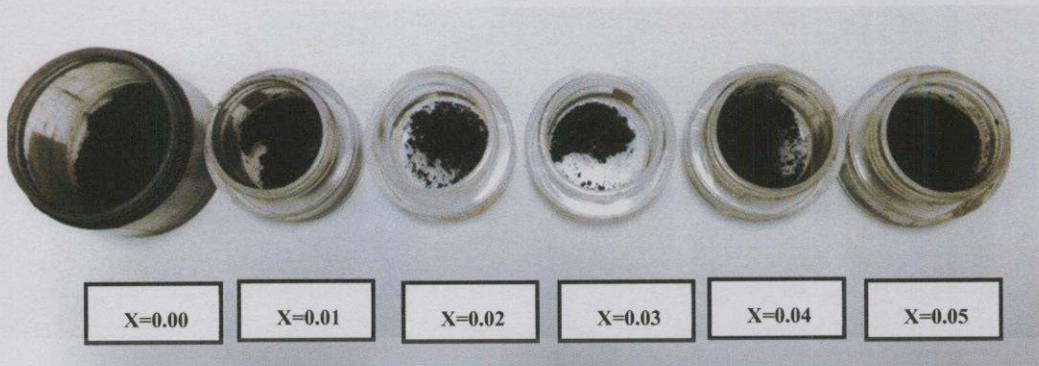
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำระดับ 3.5×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 590 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน และ ศึกษาการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีดำ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน และที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้น มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีไม่มีรูพรุนแต่จะหลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 590 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที จะแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงผงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



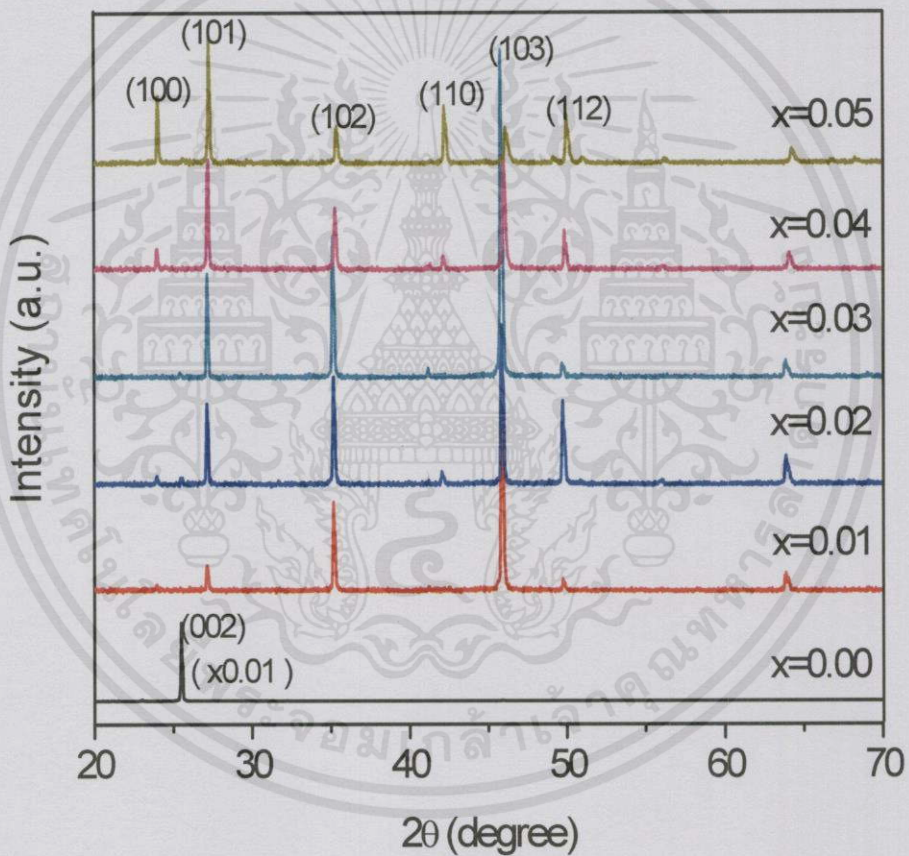
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำและสามารถหาขนาดของเกรนได้ด้วย



รูปที่ 4.3 แสดงฟิสิกส์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสารเคมี 5 นาทีกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

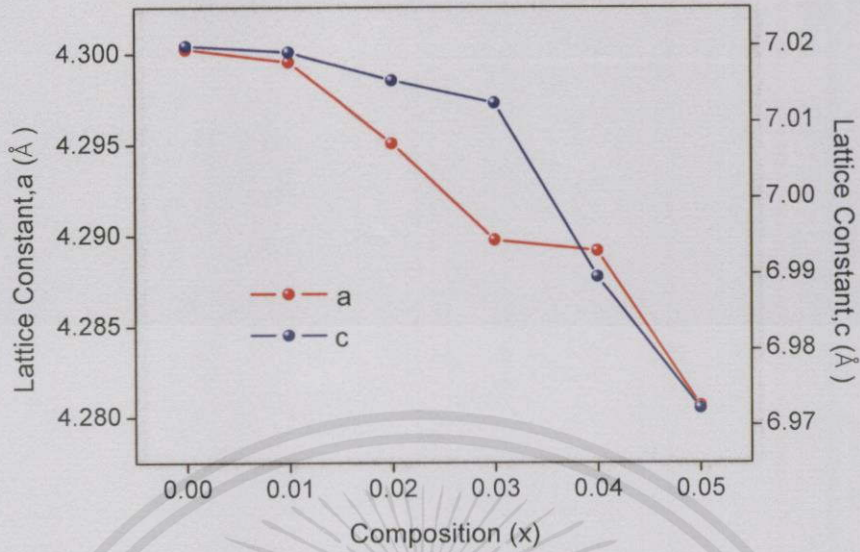
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด กรณีที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 25.50 องศา ตรงกับระนาบผลึก (002) สำหรับกรณีที่เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 พบว่าเฟสมีการเลื่อนไปทางขวาซึ่งก็คือพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางค่ามุมเลี้ยวเบน 2θ ที่โตขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Lattice Constant (\AA)		Grain size (nm) from XRD	Strain
	a	c		
0.00	4.300	7.019	94.02	-
0.01	4.299	7.019	185.19	15×10^{-4}
0.02	4.295	7.015	188.68	16×10^{-4}
0.03	4.289	7.012	208.33	17×10^{-4}
0.04	4.289	6.989	232.59	17×10^{-4}
0.05	4.281	6.972	250.00	19×10^{-4}

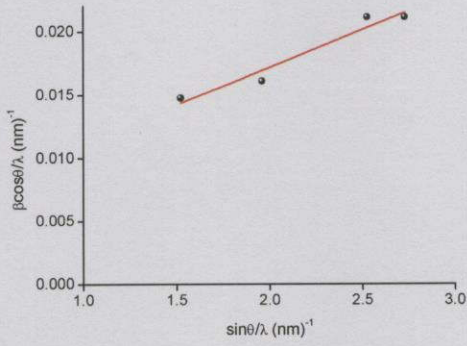
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



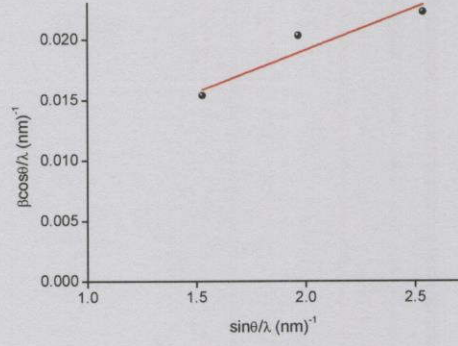
รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที

ค่าคงที่โครงสร้างผลึกสามารถอธิบายได้ด้วยรัศมีไอออนของธาตุ In^{3+} , Cd^{2+} , Se^{2-} และ S^{2-} มีค่าเท่ากับ 0.80, 0.78, 1.98 และ 1.84 อังสตรอม ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์ของผลต่างรัศมีไอออนของธาตุ Cd^{2+} กับ In^{3+} และ Se^{2-} กับ S^{2-} มีค่าเป็น 2.50 และ 7.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ารัศมีไอออนของธาตุ S^{2-} มีอิทธิพลมากกว่ารัศมีไอออนของธาตุ In^{3+}

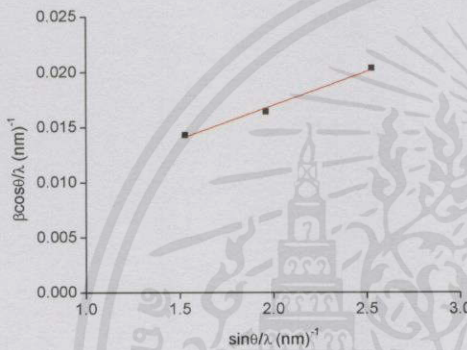
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



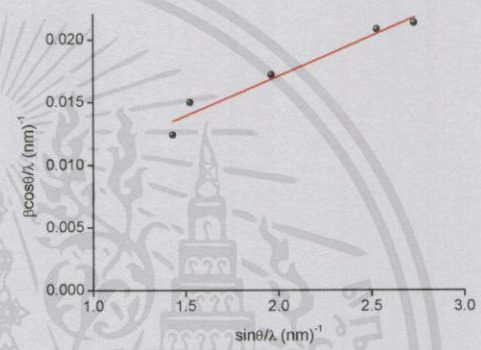
$$x = 0.01$$



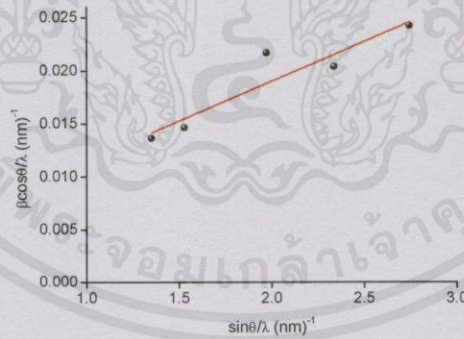
$$x = 0.02$$



$$x = 0.03$$



$$x = 0.04$$



$$x = 0.05$$

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหา ค่าขนาดของเกรน กับ ค่าความเครียด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในเอกซเรย์เป็นเอกสการระเหิดสารเคมี 5 นาทีซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกซเรย์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ

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

$$D = \frac{(1)(0.154 \times 10^{-9})}{0.00168 \cos(0.22254)}$$

$$D = 94.02 \text{ นาโนเมตร}$$

จากการศึกษาค่าขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพีคของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธีวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำอิทธิพลที่เกิดจากค่าความเครียดของสารตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

$$\beta = \beta_D + \beta_s$$

$$\beta = \left(\frac{k\lambda}{D \cos \theta} \right) + (4\varepsilon \tan \theta)$$

$$\beta \cos \theta = \left(\frac{k\lambda}{D} \right) + (4\varepsilon \sin \theta)$$

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \left(\frac{k}{D} \right) + \left(\frac{4\varepsilon \sin \theta}{\lambda} \right)$$

เมื่อ D คือ ค่าขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

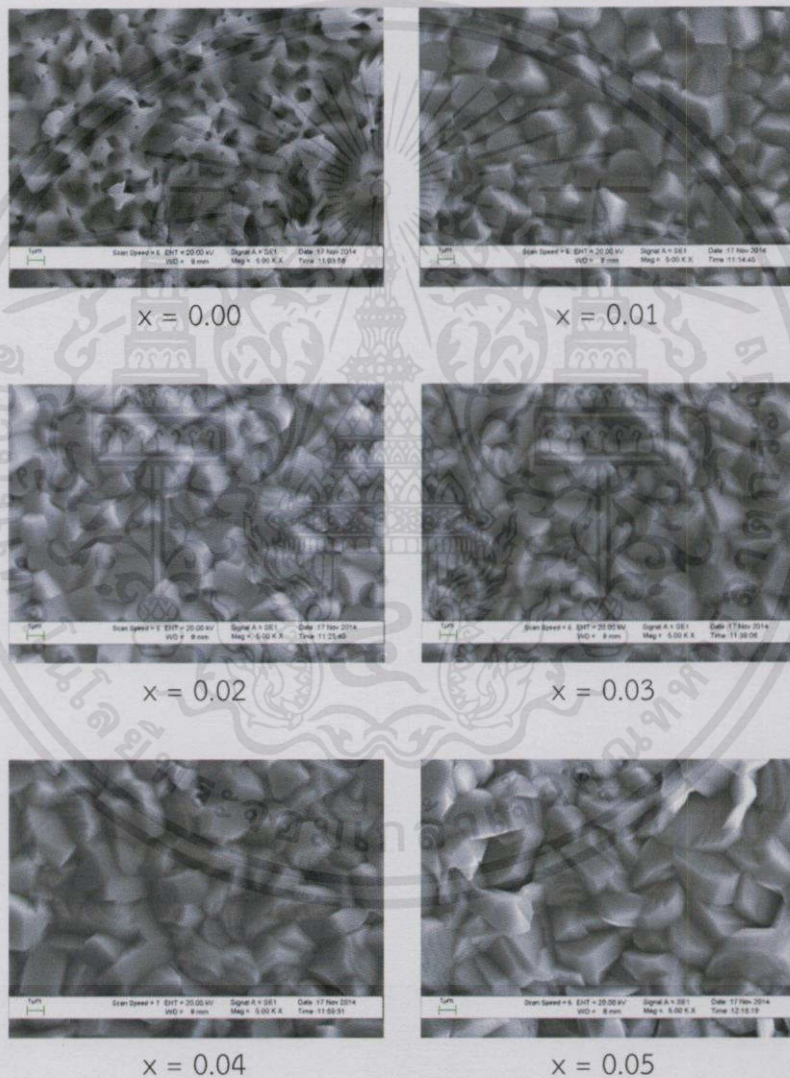
β คือ ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ε คือ ค่าความเครียด

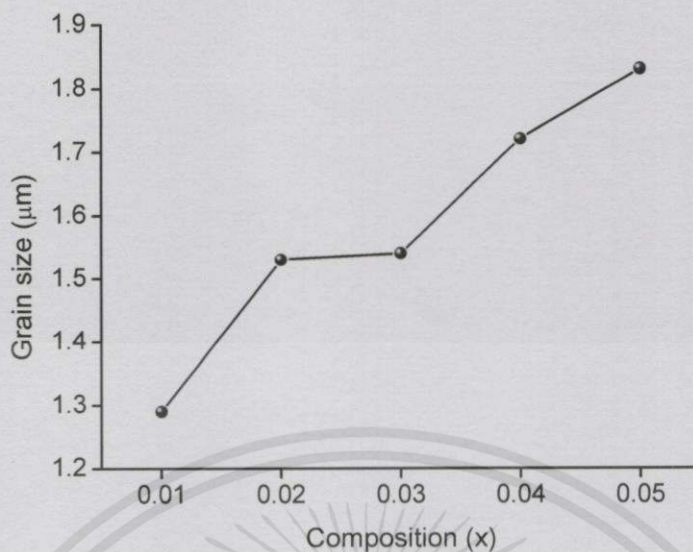
จะได้ว่าสามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากจุดตัดแกน y และหาค่าความเครียดได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6



เอกสารนี้รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

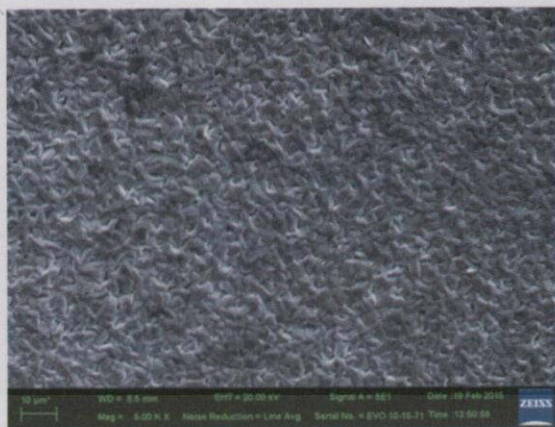


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดของเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษารวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดด้วย EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

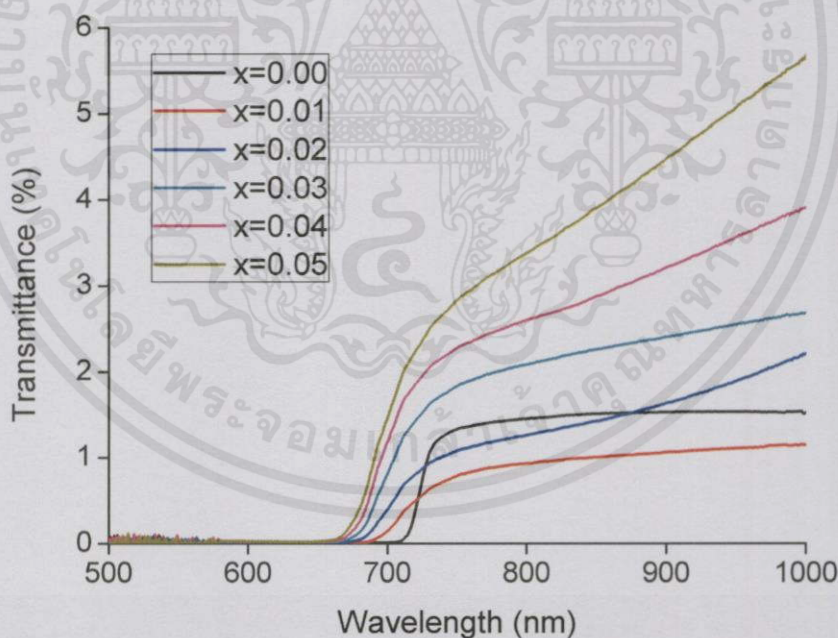
จากสเปกตรัมรูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ขององค์ประกอบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วย อะตอมของธาตุ In, Cd, Se, S และ C โดยสเปกตรัมข้างต้นแสดงถึงการยืนยันธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

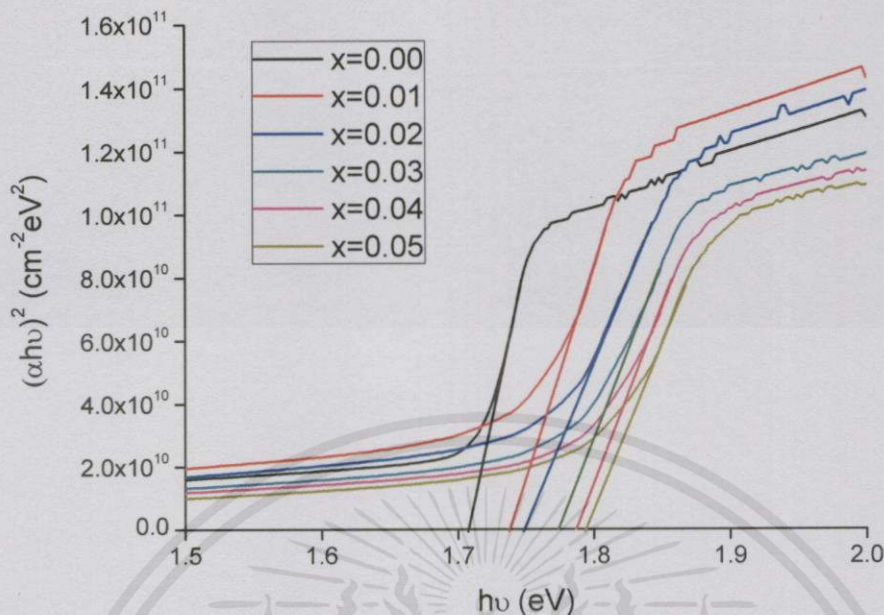
ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Element Normalized	Wt %	At %
S	2.17	6.32
Se	35.99	42.47
Cd	59.22	49.09
In	2.62	2.12
Total	100.00	100.00

4.2.4 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



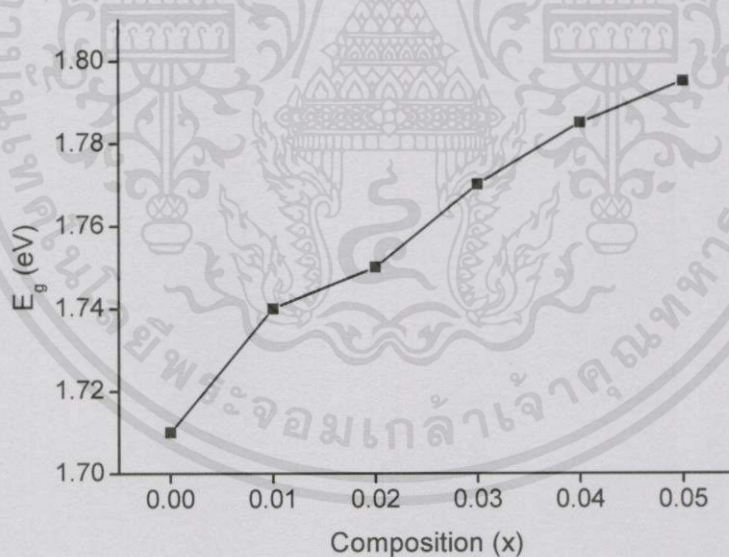
รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที พบว่าขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 710, 690, 680, 675, 670 และ 665 นาโนเมตร ของกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงมีค่าประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ ค่าพลังงานโฟตอน (hv) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนค่าพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และ ในตารางที่ 4.3

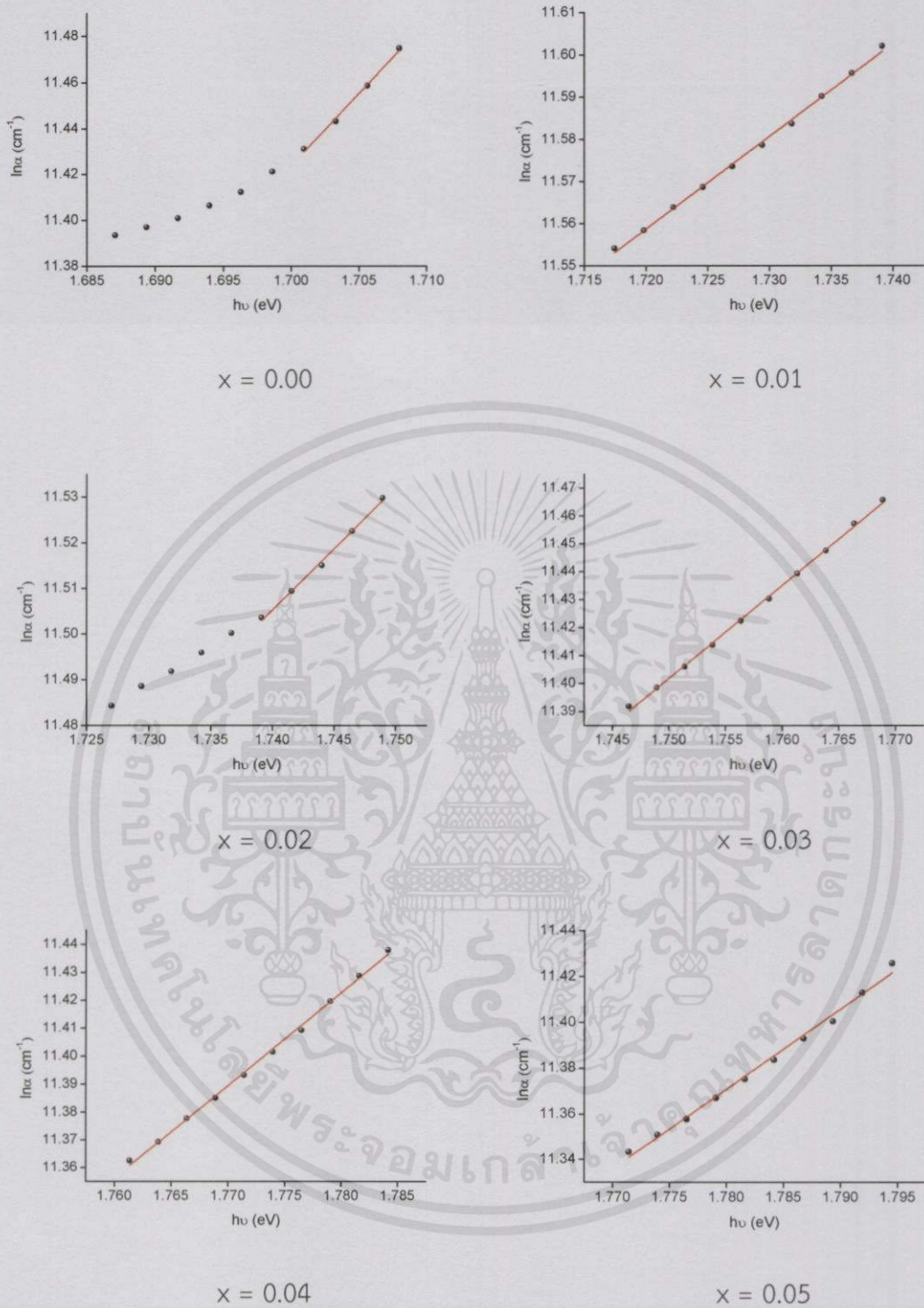
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Energy Gap (E_g) (eV)
0.00	1.710
0.01	1.740
0.02	1.750
0.03	1.770
0.04	1.785
0.05	1.795



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาทีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า "ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำข้อมูลไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที โดยส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right]$$

สำหรับที่อุณหภูมิห้องและในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า E_g จะสามารถลดรูปสมการเป็นดังนี้

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right)$$

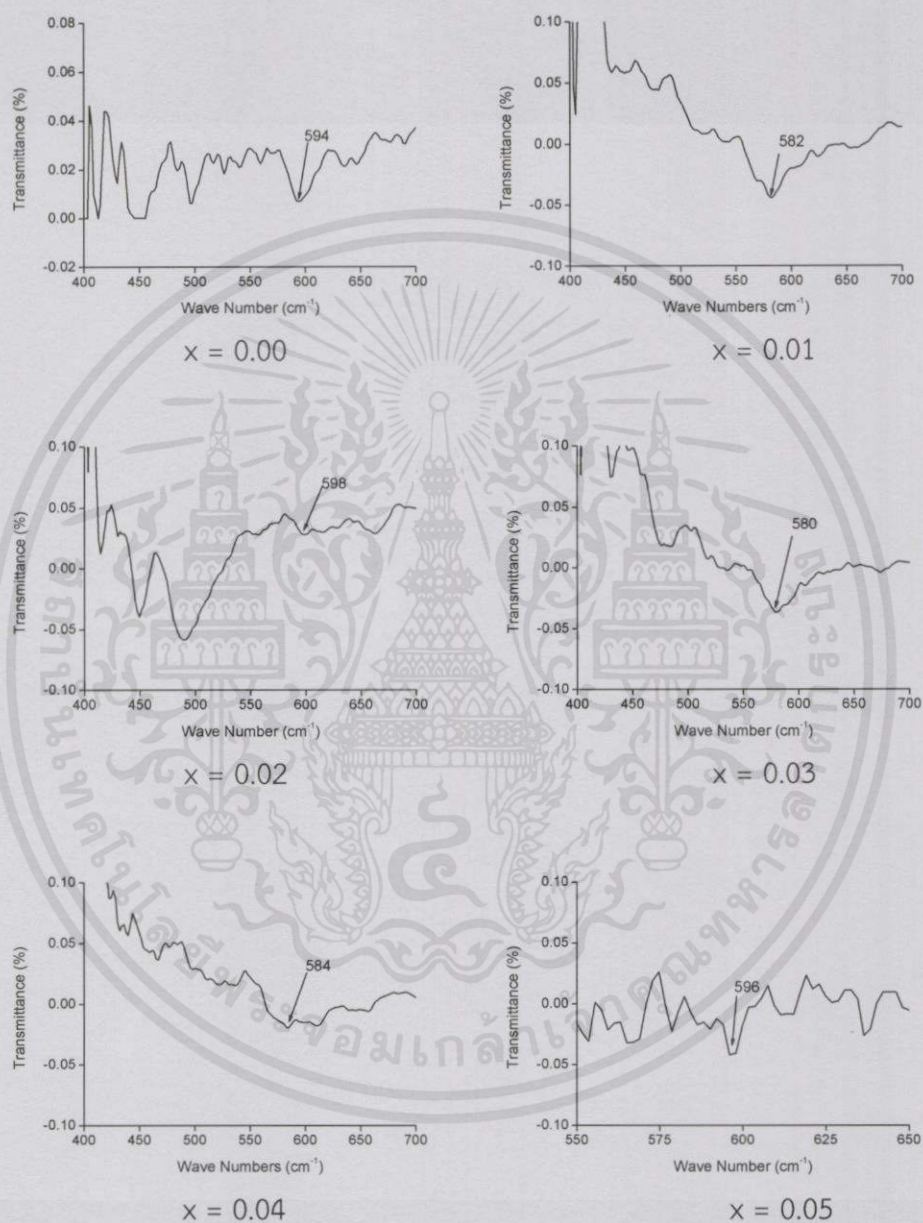
เมื่อ α_0 เป็นค่าคงที่ ส่วน E_0 เป็นค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้น ค่า E_0 จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ในช่วงพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) นำค่าความชันของกราฟมาหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ได้ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

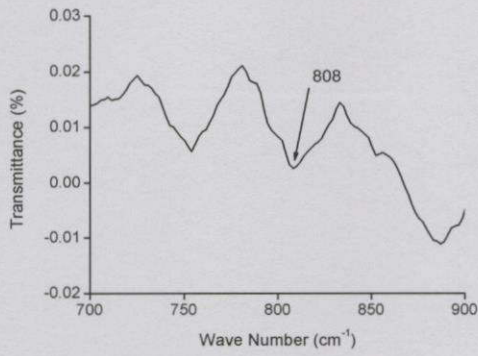
Composition (x)	Band Tail (meV)
0.00	159.71
0.01	455.42
0.02	373.75
0.03	300.83
0.04	301.61
0.05	286.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

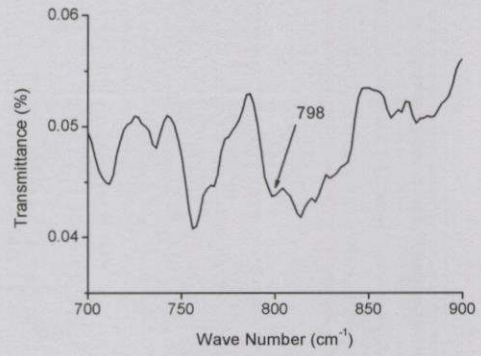
4.2.4.1 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



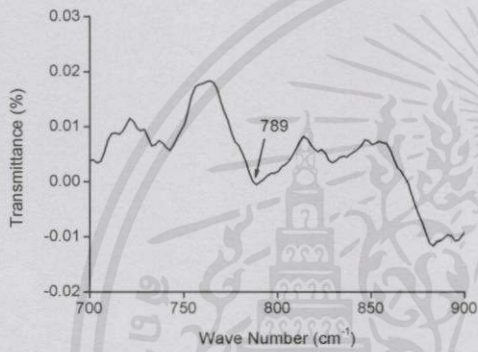
รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาน้อยกว่า 5 นาที



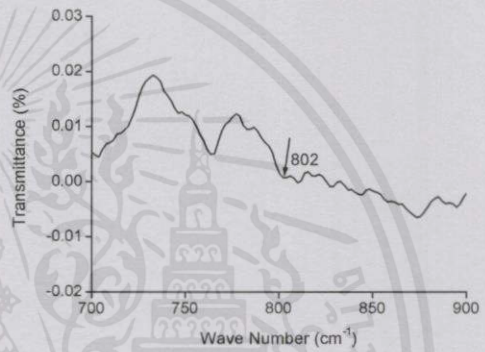
$x = 0.01$



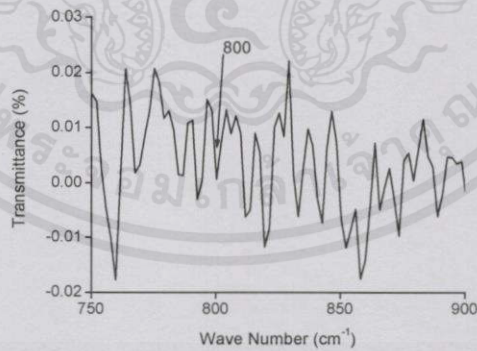
$x = 0.02$



$x = 0.03$

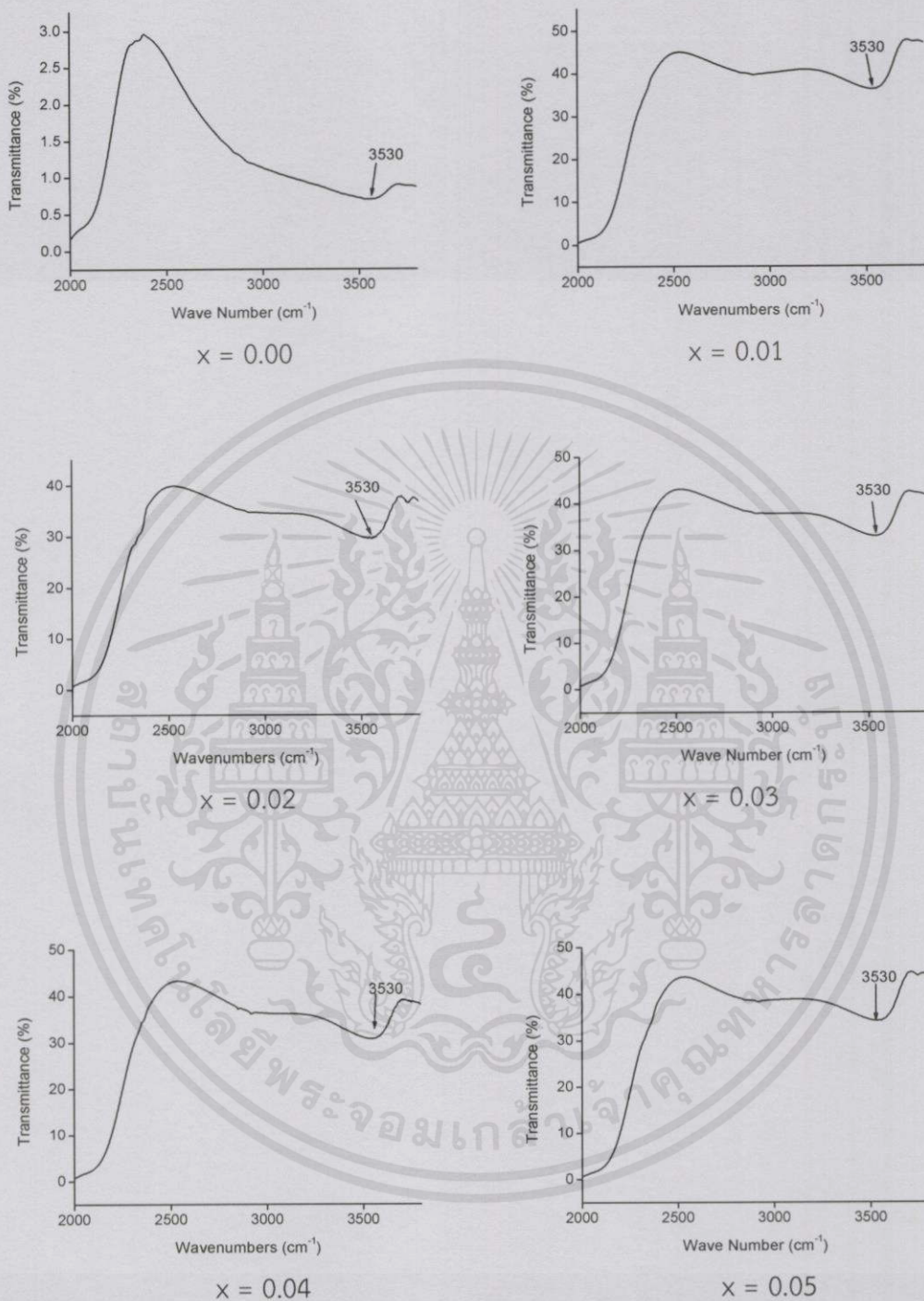


$x = 0.04$



$x = 0.05$

รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 700-900 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0.01 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 2000-3500 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากรูปที่ 4.14-4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที สามารถอธิบายได้โดยการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับค่าของความถี่ของการสั่นพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ เลขคลื่นในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร กรณี $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$ และ 0.05 ปรากฏแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-Se ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 594, 582, 598, 580, 584 และ 596 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเกิดแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ In-S ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 808, 798, 789, 802 และ 800 ต่อเซนติเมตร ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0.01$ ถึง $x=0.05$ นอกจากนี้ยังพบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ O-H อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับคณะผู้วิจัยของ Mazhar Ali (2013), S.R. Vishwakarma (2013) และ N. M. Huang (2011)

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	ค่าเลขคลื่น (cm^{-1}) ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ		
	Cd-Se bond	In-S bond	O-H bond
0.00	594	-	3530
0.01	582	808	3530
0.02	598	798	3530
0.03	580	789	3530
0.04	584	802	3530
0.05	596	800	3530

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

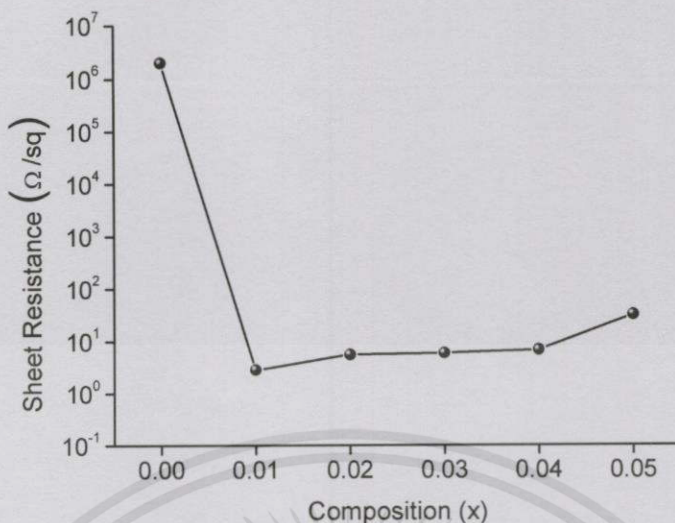
4.2.5.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 จะมีค่าความต้านทานแผ่นสูงมาก ระดับ 2.00×10^6 โอห์มต่อตารางหน่วย แต่เมื่อเจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 ในปริมาณเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.01 ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงต่ำสุดที่ 2.85 โอห์มต่อตารางหน่วย เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าสูงขึ้นจนเป็น 30.98 โอห์มต่อตารางหน่วย เมื่อ $x = 0.05$ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

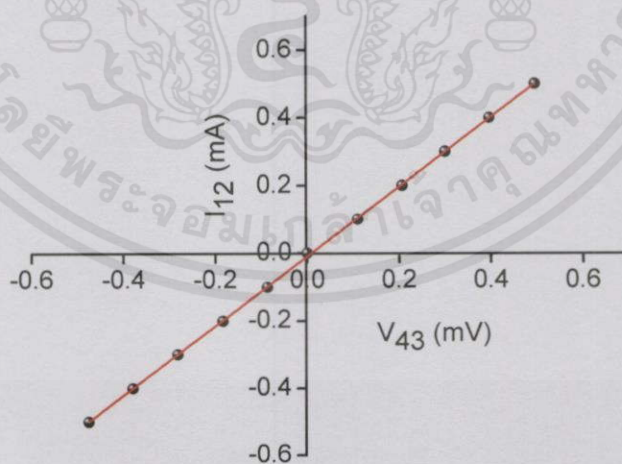
Composition (x)	Sheet Resistance (Ω/sq)
0.00	2.00×10^6
0.01	2.85
0.02	5.53
0.03	5.92
0.04	6.72
0.05	30.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

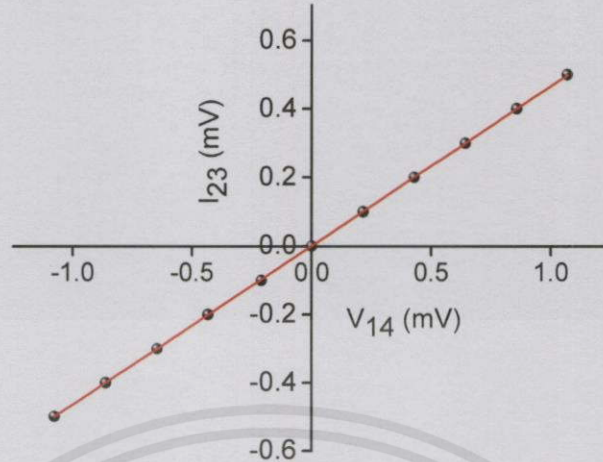


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

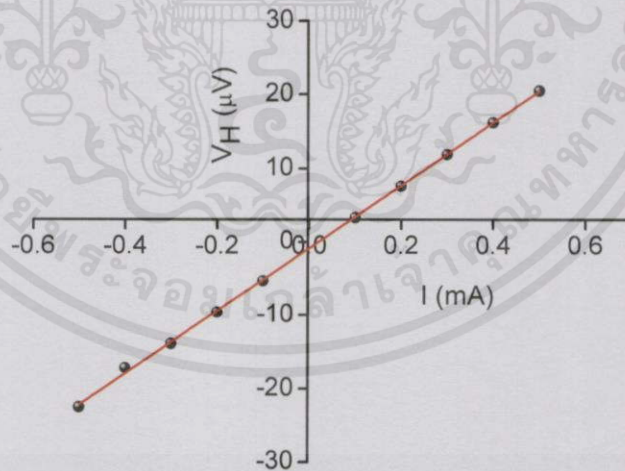
4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด



รูปที่ 4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



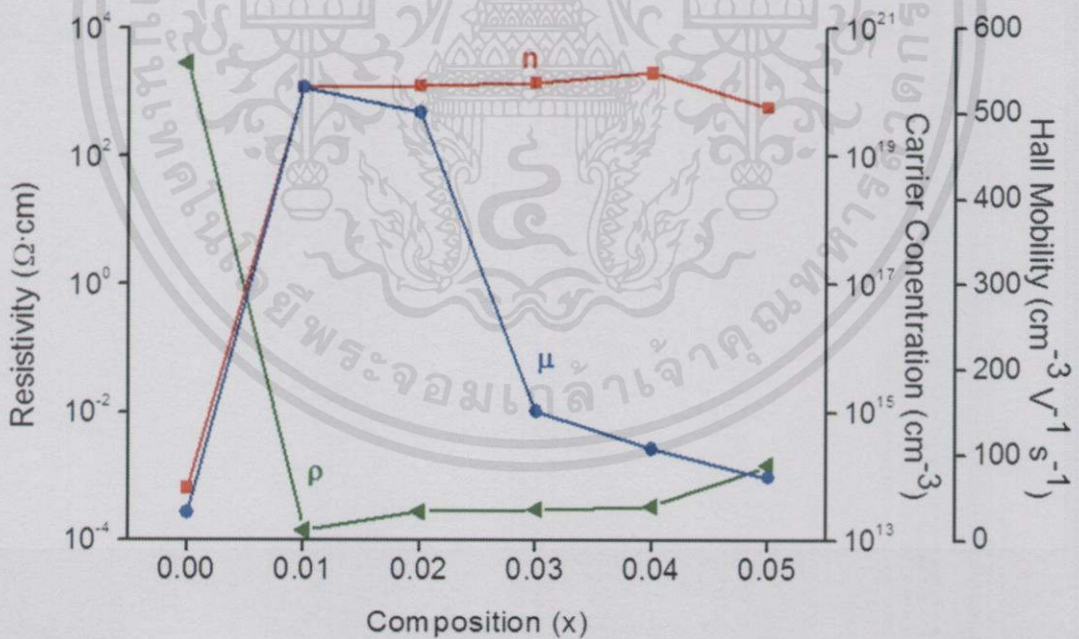
รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

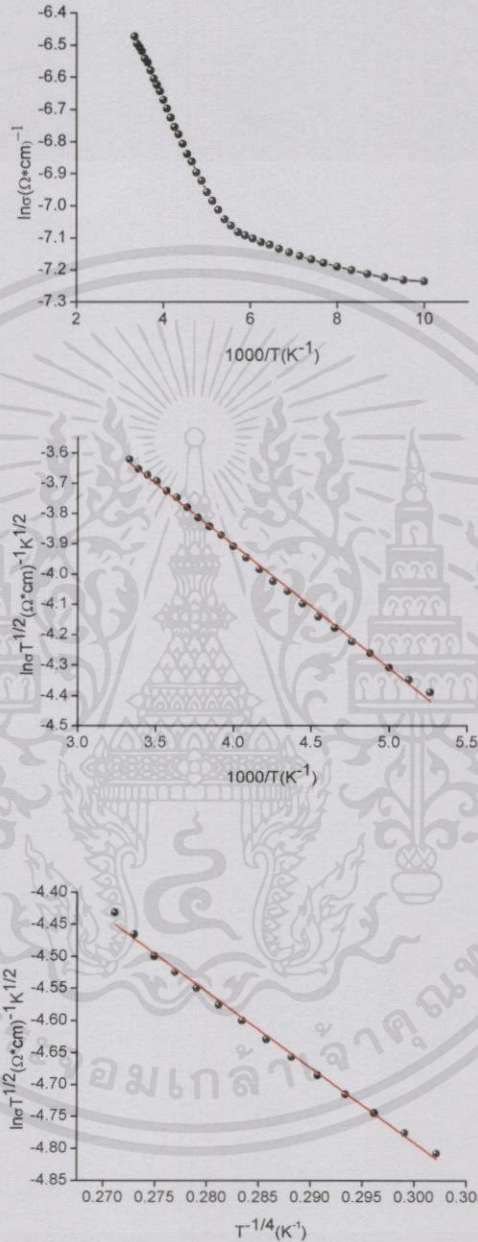
ตารางที่ 4.7 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition of (x) $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^2/C)	Electron Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
0.00	2.88×10^3	9.78×10^4	6.38×10^{13}	34.01
0.01	1.43×10^{-4}	5.32×10^{-2}	1.18×10^{20}	531.22
0.02	2.77×10^{-4}	1.40×10^{-1}	1.25×10^{20}	501.88
0.03	2.96×10^{-4}	4.60×10^{-3}	1.37×10^{20}	151.81
0.04	3.36×10^{-4}	3.17×10^{-2}	1.94×10^{20}	108.69
0.05	15.00×10^{-4}	1.12×10^{-1}	5.59×10^{19}	74.49



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.2.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ

ค่า $\ln\sigma T^{1/4}$ กับ $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งในพิธีการพิมพ์และจำหน่าย มีอยู่เพียงฉบับเดียว การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบ

วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโด ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$

- การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}}) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

$$\text{แทนค่า } E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.4073)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.035 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_s = (9.30)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.23 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_a = \frac{8\epsilon_s E_b}{e^2 L^2}$$

$$\text{แทนค่า } N_a = \frac{8(8.23 \times 10^{-13})(0.035)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (94.02 \times 10^{-7})^2}$$

$$N_a = 1.63 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

- การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left(\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right)^{1/2}$$

$$L_D = \left(\frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)(8.2305 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (1.6354 \times 10^{16})} \right)^{1/2}$$

$$L_D = 2.65 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_i)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_i$$

$$E_i = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

$$E_i = \frac{1}{2} (1.74) - 0.03513$$

$$E_i = 0.834 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_i)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$N_i = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

$$\text{โดยหา } v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า } v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)}{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{1/2}$$

$$v_c = 6.16 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

หา
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{3/2}$$

แทนค่า
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})(1.38 \times 10^{-23})(260)}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2}$$

$$N_v = 1.35 \times 10^{24} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้น

$$N_t = \left[\frac{(94.02094 \times 10^{-7})(1.6 \times 10^{-19})^2(1.3515 \times 10^{24})(1.6354 \times 10^{16})(6.1670 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (260)(1.4857 \times 10^{-9})} \right]$$

$$\times \exp \left(- \frac{0.03513 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 260} \right) + (94.02094 \times 10^{-7} \times 1.6354 \times 10^{16})$$

$$N_t = (4.9236 \times 10^{12})(1) + (1.53731 \times 10^{11})$$

$$N_t = 5.07 \times 10^{12} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ พารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

- การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซีโพเนนเชียล (σ_0)

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0$$

$$T_0 = 19473.36 \text{ เคลวิน}$$

$$\sigma_0 = 0.2872 \text{ ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ ($N(E_F)$)

จาก $T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$

เมื่อ $\alpha = 1.24 \times 10^7$ ต่อตารางเซนติเมตร

$k = 1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q}T_0} = 2.0433 \times 10^{22} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R)

$$R = \left[\frac{9}{8\pi c k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

สามารถหาค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (α) ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $\alpha = 1.24 \times 10^7$ ต่อเซนติเมตร นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
แทนค่า

$$R = \left[\frac{0.135}{(150)(2.0433 \times 10^{22})^{1/4}} \right]$$

$$R = 1.020 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)}$$

$$W = \frac{3}{4\pi (1.0203 \times 10^{-7})^3 (2.0433 \times 10^{22})}$$

$$W = 0.011 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

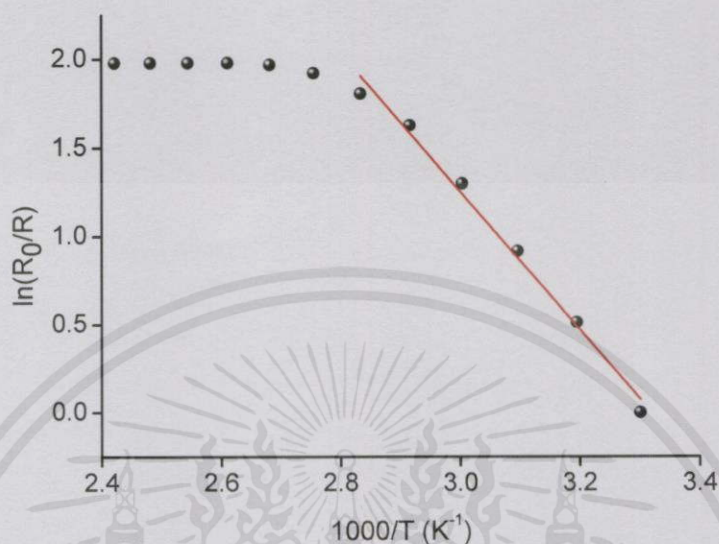
และ

$$\alpha R = 1.24 \times 10^7 \times 1.0203 \times 10^{-7}$$

$$\alpha R = 1.265$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากรูปที่ 4.23 เป็นผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที โดยวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 303-400 เคลวิน จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากสมการ

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องแจ้งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า} \quad E_a = \frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-3.9193)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

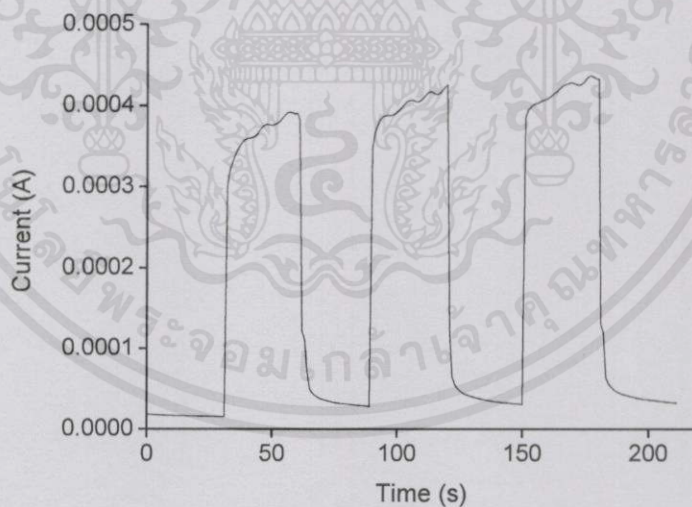
$$E_a = 0.3380 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เมื่อ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

4.2.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสโฟโตขาลง ซึ่งจากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบว่าช่วงเวลาตอบสนองสั้นมากในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น โดยเวลาขาขึ้นสามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสง ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้ คือ

$$S = \left(\frac{R_{dark} - R_{light}}{R_{dark}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\%$$

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่ง นิยามความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนี้

$$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$$

ในทางปฏิบัติมักมีการบ่อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆ จากความสัมพันธ์

$$S = \frac{I_{light}}{I_{dark}}$$

และผลการทดลองของกระแสโฟโตชาขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่อุณหภูมิห้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.8 จาก

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R_{dark} = \frac{30V}{1.53 \times 10^{-5} A} = 1.96 \times 10^6 \Omega$$

$$R_{light} = \frac{30V}{3.69 \times 10^{-4} A} = 8.13 \times 10^4 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Photosensitivity (S)	
$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$
$S = 95.85$	$S = 24.11$

สำหรับช่วงกระแสโฟโตฮาลลงจะเป็นตามสมการ

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d}$$

จากการศึกษาพบว่าเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

$$I = \sum_2^n A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{d(n-1)})] + A_n [\exp((-t/\tau_{dn})^\beta)]$$

จากผลการทดลองสามารถเขียนได้ดังนี้

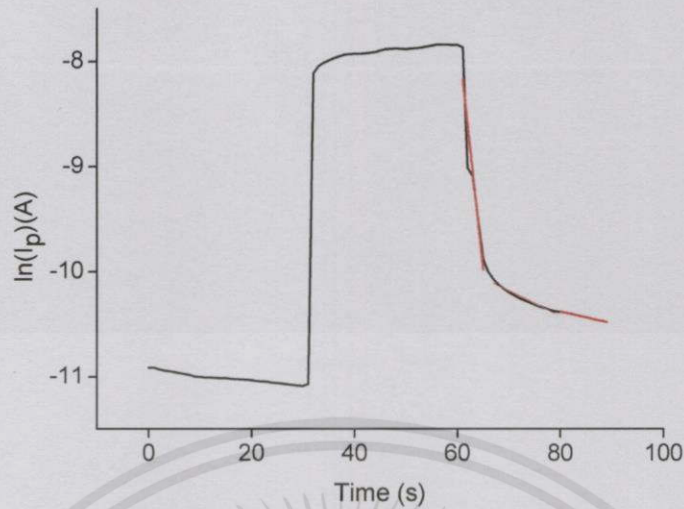
$$I = A_1 [\exp(-t/1.1043)] + A_2 [\exp(-t/41.8235)] + A_3 [\exp(-t/90.4977)^\beta]$$

และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักประจุได้จากสมการ

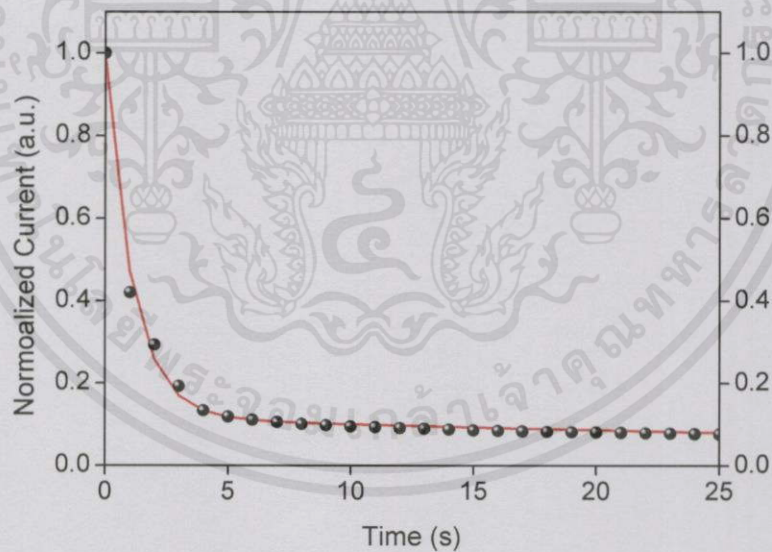
$$\sigma_i = \frac{I_n}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

และผลการทดลองของกระแสโฟโตฮาลลงของสภานำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe จะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีเอกสารนี้เป็นเอกสาร 5 นาทีนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงตั้งต้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

	1 st Term	2 rd Term	3 rd Term
Decay Time (s)	$\tau_{d1} = 1.1043$ $A_1 = 3.22 \times 10^{-4}$	$\tau_{d2} = 41.8253$ $A_2 = 2.87 \times 10^{-5}$	$\tau_{d3} = 90.4977$ $A_3 = 1.39 \times 10^{-5}$ $\beta = 0.2377$
Decay Component	$I_1 = 0.38 \text{ mA}$ $\sigma_{i1} = 4.67 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$I_2 = 0.29 \text{ mA}$ $\sigma_{i2} = 2.45 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$I_3 = 0.08 \text{ mA}$ $\sigma_{i3} = 9.79 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

หมายเหตุ σ_i หาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_i = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้า (V_a)

$$= 30 \text{ โวลต์}$$

ค่าสภาพคล่องพาหะ (μ) ของ CdSe

$$= 34.02 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)}$$

ค่าความกว้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

$$= 1 \text{ เซนติเมตร}$$

ค่าความยาวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

$$= 0.5 \text{ เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2S_3 ความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น (source) และ อุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 5 นาที พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกรณีที่ไม่เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีดำ ส่วนกรณีที่มีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เจือด้วยสารประกอบ In_2S_3 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีเทา

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม $(x) = 0$ พิกของระนาบ (002) จะปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 พบว่าพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางที่มุม 2θ ที่โตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c มีแนวโน้มลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด พบว่าเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีขนาดโตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถที่จะคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.71 เป็น 1.78 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0$ ถึง $x=0.05$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และ วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0$ ถึง $x=0.05$ สำหรับค่าสภาพคล่องฮอลล์มีค่ามากที่สุดที่ $x=0.01$ หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วน

โดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ $x=0.04$ และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น และได้ทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของซีโตและแบบจำลองของการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ (transient photoconductivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบว่าในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นชีวิตของพาหะนั้นสั้นมาก ซึ่งค่าความไวแสงมีค่าเป็น 95.85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกระแสโฟโตชาลงพบว่าเกิดปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น กล่าวคือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักพาหะมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการพิศกรรภาพของผลการทดลอง โดยใช้ฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ถ้ามีความสะอาดไม่เพียงพอจะเป็นสาเหตุทำให้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไม่ติด
2. สำหรับการติดตั้งระบบผู้ติดตั้งควรศึกษาอย่างละเอียด และฝึกให้ชำนาญ ก่อนจะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
3. ขณะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังไม่ให้กล่องแกรไฟต์พลิกซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความร้อน ความดันภายใน และเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น
4. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ควรรับมาวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เพื่อป้องกันฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำหลุดร่อน
5. ในขณะที่ทำซ้ำไฟฟ้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังมือห้ามสัมผัสกับผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และทำซ้ำไฟฟ้าให้มีลักษณะเล็ก เรียว และคมให้มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม ไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เฉลิมพล รุจรดาวงศ์, บุศรา นรารักษ์ และเบญจวรรณ ใจสว่าง. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางของตัวนำออกไซด์โปร่งแสงบางชนิด.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วุฒิไกร คำอ่อน, ศตพล ศิวายพราหมณ์ และศุภฤกษ์ จันทะโบราณ. 2556. “สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุภฤกษ์ เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดุลย์ หาญวังม่วง. 2550. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อุปลักษณ์ นาครักษ์. 2548. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวง ซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Acharya, A., Mishra, R. and Ryo G.S. 2010. “Comparative Study of Performance of CdS, CdSe Thin Film CdS-PTh, CdSe-PTh Nanocomposite Thin Films Using SEM-EDXA (Scanning Electron Microscope) and FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy).” *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 4(3) : 603-609.
- Caballero R. and Guillen C. 2003. “Optical and Electrical Properties of $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ Thin Films Obtained by Selenization of Sequentially Evaporated Metallic Layers.” *Thin Solid Films.* 431-432 : 200-204.
- Cullity, B.D. 1956. *Elements of X-rays Diffraction.* Addison-Wesley Publishing Company Inc. : pp 9-14.
- Dieter K.S. 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization.* 2nd ed. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Elangovan E. and Ramamurthi K. 2003. “Optoelectronic Properties of spray deposition $SnO_2:F$ Thin Film For Windows Materials in Solar Cells.” *J. Optoelect. Adv. Mat.* 5 : 45-54.
- Fahrenbruch A.L. and Bube R.H. 1983. *Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion.* New York : Academic Press Inc. : 44.
- Ghosh, 2007. “Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction.” *App. Phys. Lett.* 87, 243512-1-243512-3.
- Gu. 2005. “Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Films Transistors.” *Appl. Phys. Lett.* 87 : 243512-1-243512-3.
- Huang N. M. 2011. “Synthesis and Characterization of In_2S_3 Nanorods in Sucrose Ester Water-in-Oil Microemulsion.” *Journal of Nanomaterials.* 815709-6.

- Huang. 2011. "Effect of The Induced Electron Traps By Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors." *Appl. Phys. Lett.* 99 : 113301-1-113301-3.
- Jiang, F. 2012. "Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Film Prepared by Sulfurization Method." *J. Elec. Matter.* 41(8) : 2204-2209.
- Johnson. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN." *Appl. Phys. Lett.* 68(13) : 1808-1810.
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics.** 4th ed. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Lin, J.H. 2012. "Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on The Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si." *Appl. Phys. Lett.* 100, 153509-1-153509-4.
- Marquardt, M.A. Ashmore, N.A. and Cann, D.P. 2006. "Crystal Chemistry and Electrical Properties of The Delafossite Structure." *Thin Solid Films.* 496 : 146-156.
- Mazhar, A. Waqar, A.A. Syed, Zubair, M. Nazar, A. Shah and Mehmood, A. 2013. "Physical Properties of Sb-doped CdSe Thin Films By Thermal Evaporation method." *Applied Surface Science.* 284 : 482- 488.
- Ren 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra For ZnO-Nanowire Film Modulated By Water Molecules." *Chin. Phys.* 21(3), 038104-1-038140-7.
- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument.** 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill.
- Syudenikin. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown By Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution." *J. Appl. Phys.* 83(4) : 2104-2111.
- Tilley, R.J.D. 2004. **Understanding Solids : The Science of Materials.** Chichester : John Wiley & Sons.
- Van der Pawn L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Repts.* 13 : 1-9.
- Vishwakarma, S.R. Kumar, A. Prasada, S. and Tripathi R.S.N. 2013. "Synthesis and Characterization of n-CdSe Thin Films Deposited at Different Substrate Temperatures." *Chalcogenide Letters.* 10(10) : 393 - 402.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Pattern : 77-2307		Radiation = 1 540600		Quality : Calculated		
Cd Se		2th	I	h	k	l
Cadmium Selenide		23 882	100	1	0	0
		25 391	59	0	0	2
		27 097	76	1	0	1
		35 136	34	1	0	2
		41 999	72	1	1	0
		45 810	68	1	0	3
		48 888	11	2	0	0
		49 718	42	1	1	2
		50 699	10	2	0	1
		52 150	1	0	0	4
		55 879	7	2	0	2
		58 130	1	1	0	4
		63 884	19	2	0	3
		66 379	13	2	1	0
		67 880	7	2	1	1
		69 099	1	1	1	4
		71 902	13	1	0	5
		72 296	5	2	1	2
		74 268	<1	2	0	4
		76 735	7	3	0	0
		79 435	17	2	1	3
		82 365	6	3	0	2
		82 496	2	0	0	6
		85 916	6	2	0	5
		87 422	1	1	0	6
		89 181	<1	2	1	4
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 191.37				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 112.20				
a = 4.29900		Dx = 5.665				
c = 7.01000		Z = 2				
		Mcor = 5.78				
ICSD COLLECTION CODE : 060630						
REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of						
Fakineos, Stevenso						
REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35 415 424						
TEST FROM ICSD : At least one TF missing						
Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference						
*Acta Crystallogr. Sec. B: Structural Science, volume 40, page 530, (1984) ;						
Stevenson, A.W., Barnea, Z.						
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวราตรี ภู่ออด
วัน เดือน ปีเกิด 3 พฤษภาคม 2535
ภูมิลำเนา 594/1 ถ.ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง จ.กรุงเทพ
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนพรตพิทยพยัต
ปี พ.ศ.2554 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาวสุนิสา อุดมมาลี
วัน เดือน ปีเกิด 5 กุมภาพันธ์ 2536
ภูมิลำเนา 7 หมู่ 7 ต.นางแก้ว อ.โพธาราม จ.ราชบุรี
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์
ปี พ.ศ.2554 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้