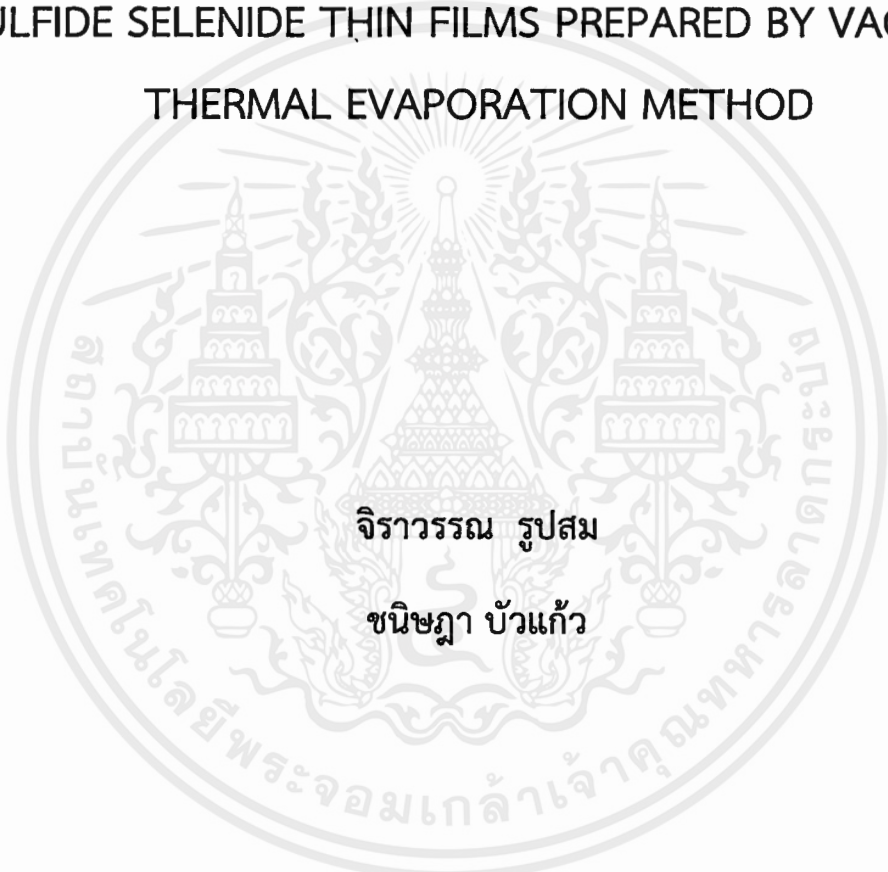


สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางคอปเปอร์ทิน
ซัลไฟด์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน
ภายในระบบสุญญากาศ

OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF COPPER TIN
SULFIDE SELENIDE THIN FILMS PREPARED BY VACUUM
THERMAL EVAPORATION METHOD



จิวรรณ รูปสม

ชนิษฐา บัวแก้ว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTOELECTRONIC PROPERTIES OF COPPER TIN
SULFIDE SELENIDE THIN FILMS PREPARED BY VACUUM
THERMAL EVAPORATION METHOD



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางคอปเปอร์ทินซัลไฟด์ซีลีไนด์
ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
Optoelectronic Properties of Copper Tin Sulfide Selenide
Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิราวรรณ รูปสม รหัสนักศึกษา 58051045
นางสาวชนิษฐา บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 58051050

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์
ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์ กรรมการ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางคอปเปอร์ทินซัลไฟด์ซีลีไนด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิราวรรณ รูปสม รหัสนักศึกษา 58051045
	นางสาวชนิษฐา บัวแก้ว รหัสนักศึกษา 58051050
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ เคลือบลงแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียสซึ่งใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที แล้วทำการศึกษาลักษณะวิทยาพื้นผิวโดย AFM และ FESEM พบว่าฟิล์มบางเมื่อผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดของเกรนในระดับนาโนเมตรมีแนวโน้มลดลงและพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลง จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกซึ่งมีระนาบที่โดดเด่นคือ (202)/(130) จากการศึกษาการส่งผ่านทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1400 นาโนเมตร พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เตรียมได้มี 2 ค่าอยู่ที่ประมาณ 1.2 และ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว แบบจำลองเซลล์ไมเออร์ และแบบจำลองสปีดเซอร์-แพน ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ จากการศึกษาสภาวะนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน อย่างละเอียดพบว่ากลไกการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิดได้แก่การกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน การกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของมอตต์ และการกระโดดในระยะไม่คงที่ในแบบจำลองของเอฟโรส-ชล็อพสกีซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300-210 เคลวิน 200-110 เคลวิน และ 100-50 เคลวินตามลำดับค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเหล่านี้อาจมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : ฟิล์มบางคอปเปอร์ทินซัลไฟด์ซีลีไนด์วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน แบบจำลองเซลล์ไมเออร์ แบบจำลองสปีดเซอร์-แพน แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

Title	Optoelectronic Properties of Copper Tin Sulfide Selenide Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method	
Student	Miss Jirawan Rupsom	Student ID 58051045
	Miss Chanitsada Buakaew	Student ID 58051050
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang	

Abstract

In this special project, $\text{Cu}_2\text{S}(\text{S},\text{Se})_3$ thin films were prepared by thermal evaporation method on glass substrate in vacuum system and then annealed at 100-400 °C for 60 min. Surface morphology was investigated by AFM and FESEM, respectively. Grain size and roughness values in nanometer scale were decreased as the increase of annealing temperature. XRD revealed that the films exhibited the monoclinic structure with preferred orientation of $(\bar{2}02)/(130)$ planes. Energy gap values of the films having around 1.2 and 1.9 eV were determined from the transmission spectra in the wavelength range 400-1400 nm. The important optical parameters were calculated from the single oscillator model, Sellmier's model and Spitzer-Fan model, respectively. Electrical properties of the films were evaluated by resistivity and Hall effect measurements in the van der Pauw configuration. Detailed analysis of temperature dependence of conductivity of the films showed that three types of behavior can be expected : NNH, Mott-VRH and ES-VRH in the temperature range 300-210K, 200-110K and 100-50K, respectively. These parameters might be useful for solar cell application.

Keywords : $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ thin films, Thermal evaporation method, Single oscillator model, Sellmier's model and Spitzer-Fan model

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ อาจารย์ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง และให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดี ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ การใช้ชีวิต ตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน และคอยช่วยเหลือจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นางสาวปาริชาติ คำหมอน และ นายมนตรี หาญไก่อ นักศึกษาปริญญาโท และขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับมิตรภาพที่ดี ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง ตลอดจนการให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่กันมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน รวมถึงเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมา

จิรวรรณ รูปสม

ชนิษฐา บัวแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก.....	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	4
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก.....	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$	9
2.3 ข้อบกพร่องผลึก.....	12
2.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด.....	13
2.3.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น.....	15
2.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ.....	15
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	15
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.....	15
2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	18
2.6.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง.....	20
2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 พูรีเยร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	25
2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ.....	26
2.8.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก.....	26
2.8.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก.....	28
2.9 สภาพนำไฟฟ้า.....	32
2.10 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	33
2.10.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	33
2.10.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์.....	35
2.11 ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	36
2.11.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์.....	41
2.12 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ.....	44
2.12.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง.....	45
2.12.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิมานกลาง....	47
2.12.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่.....	50
2.13 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว (single oscillator model).....	52
2.14 ค่าคงที่ได้ิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (dielectric spectroscopy).....	60
2.14.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model)	60
2.15 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงด็อร์ัน.....	65
2.15.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดีกพาหะในช่วงกระแสโ้โตชาลง	73
2.15.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดีกพาหะในช่วงกระแสโ้โตชาขึ้น	73
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	75
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	78
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	78
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์.....	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส.....	78
3.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส.....	79
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ.....	79
3.2.2 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ที่มีองค์ประกอบต่างๆ.....	79
3.2.3 ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส.....	80
3.2.4 ขั้นตอนในการอบ (Annealed) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส.....	82
3.3 ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส.....	84
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	84
3.3.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(FESEM).....	84
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	85
3.3.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM).....	85
3.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	86
3.3.5.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว.....	86
3.3.5.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	86
3.3.5.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์.....	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	91
4.1 ลักษณะฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนในระบบสุญญากาศ.....	91
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสาร เคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	93
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	93
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณ ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	94
4.2.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แรงอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บน แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	96
4.2.4 ผลการศึกษาผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	98
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	99
4.3.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและ ไม่แอนนีส.....	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส.....	105
4.3.3 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส.....	106
4.3.4 การหาค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส.....	108
4.3.5 การหาค่าฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส.....	110
4.3.6 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีสโดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว.....	113
4.3.7 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีสโดยอาศัยแบบจำลองเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ (Sellmeier Oscillator).....	116
4.3.8 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีสโดยอาศัยแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน (Spitzer-Fan model)...	118
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่ง $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่แอนนีสและไมแอนนีส.....	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่แอนนีสและไมแอนนีส.....	122
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่แอนนีสและไมแอนนีส.....	127
4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่บุกออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำมาแอนนีสและไมแอนนีส.....	133
4.5 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำมาแอนนีสและไมแอนนีส.....	149
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	155
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	155
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	158
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	5
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ.....	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z).....	8
4.1 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	95
4.2 ผลการศึกษาผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	98
4.3 ค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสและไม่แอนนีส.....	102
4.4 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ความยาวคลื่น 1240 nm.....	112
4.5 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวแบบจำลองเซลไมเออร์และแบบจำลองสปิตเซอร์-แพน....	121
4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไม่แอนนีส.....	132
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน(NNH)ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	145
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	146
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณได้จากแบบการกระโดดแบบเอฟโรส-ชอพลกีของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	147

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	150
4.11 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	153
4.12 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	154

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	4
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก.....	8
2.3 แสดงโครงสร้างผลึก SnSe.....	9
2.4 แสดงโครงสร้างผลึก Cu ₂ S.....	10
2.5 แสดง (ก) XRD patterns of CTSSe โครงสร้างผลึกของ Cu ₂ SnS ₃ (ข) และ Cu ₂ SnSe ₃ (ค) ตามลำดับ.....	10
2.6 สเปกตรัมรามันของ CTSSe NCs ที่มีองค์ประกอบของ x ต่างกัน.....	12
2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ.....	13
2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู.....	14
2.9 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน.....	14
2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์.....	16
2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	17
2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย.....	18
2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 เคลวิน).....	20
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (T = 0 เคลวิน).....	20
2.15 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง.....	21
2.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน.....	23
2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ.....	25
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น กับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	30
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	34
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและ สภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์.....	35
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิคแวนเดอร์เพาว์.....	35
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	38
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่าง ที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ.....	42
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V _H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I).....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน.....	45
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).....	49
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$	49
2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF.....	56
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	56
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS.....	57
2.31 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ.....	66
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น.....	69
2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น ทั้งช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตชาลง.....	70
2.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง.....	73
2.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น.....	74
2.36 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิเตาที่ใช้แอนนีสล.....	76
2.37 การใช้ XRD วิเคราะห์สาร.....	76
2.38 แสดงภาพผิวหน้าและตัดขวางจาก SEM ที่แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่เรียงตัวกันอยู่ (แถวบน) และแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอบ(แถวล่าง).....	77
3.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้น Cu ₂ SnS ₂ Se ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลอง.....	80
3.2 แสดงระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	81
3.3 แสดงระบบของเตาอบ (Annealed) ฟิล์ม.....	82
3.4 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance.....	84
3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่นFESEM-EDS (7610F).....	84
3.6 ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2600.....	85

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100.....	85
3.8 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาเวอร์ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์ม.....	87
3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า(V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ.....	87
3.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า(I_{23})กับ ศักย์ไฟฟ้า(V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ.....	88
3.11 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์.....	89
3.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า(V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ.....	90
4.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้น $Cu_2Sn(S,Se)_3$	92
4.2 แสดงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	92
4.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $Cu_2Sn(S,Se)_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	93
4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	94
4.5 แสดงภาพถ่าย FESEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	96
4.6 แสดงสเปกตรัม EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	97

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200,300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	99
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่ผ่านการแอนนีส.....	100
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	100
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	101
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	101
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	102
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ($\ln\alpha$) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	103
4.14 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที.....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	104
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	105
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	106
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	107
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	107
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสง เชิงซ้อน (σ_1) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสง เชิงซ้อน (σ_2) กับ ความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	109
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตรกับพลังงานแสงของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีส และนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการ แอลนีส 60 นาที.....	109
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิวกับพลังงานแสงของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีส และนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการ แอลนีส 60 นาที.....	111
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)/(n^2-2)$ กับ $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีส ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	111
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศา เซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	113
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (n^2-1) กับ $(h\nu)^2$ ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	116
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(\mathcal{L})^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศา เซลเซียสใช้เวลาในการแอลนีส 60 นาที.....	117

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า (n^2-k^2) กับ λ^2 ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที.....	118
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(-4\pi x_c)$ กับ λ^2 ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที.....	120
4.30 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ไม่แอนนัล.....	122
4.31 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ไม่แอนนัล.....	122
4.32 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	123
4.33 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	123
4.34 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	124
4.35 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	124
4.36 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	125
4.37 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	125

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	126
4.39 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	126
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ไม่แอนนีส.....	127
4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่ไม่แอนนีส.....	127
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	128
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	128
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	129
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	129
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	130
4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	130

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	131
4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ นำมาแอนนีกที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	131
4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีกและนำมาแอนนีกที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	132
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีก.....	138
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีกอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....	139
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีกอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	140
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีกอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	141
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีกอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.56 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด.....	148
4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนिलและนำไปแอนนिलที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	149
4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนिलและนำไปแอนนिलที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ.....	151
4.59 การพิกตรภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มีลไลซ์خالลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนिलและนำไปแอนนिलที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส.....	152

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนเริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตมากขึ้น เนื่องจากพลังงานจากฟอสซิลที่รู้จักในนามของถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าที่มีจุดอ่อนหลายประการทั้งในด้านของปริมาณที่มีอยู่อย่างจำกัดใช้แล้วหมดไปและการเผาไหม้ของฟอสซิลมีการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกไซด์ และฝุ่นละออง ฯลฯ หากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มักเกิด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อเกิดการสะสมในบรรยากาศจำนวนมากทำให้เกิด “ปรากฏการณ์เรือนกระจก” เป็นต้นเหตุของปัญหาสภาวะโลกร้อน จึงนำไปสู่แนวทางการนำพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดปราศจากมลพิษอย่างเช่น พลังงานน้ำ ลม และแสงอาทิตย์ใช้แทนฟอสซิล ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานประเภทหมุนเวียนที่มีศักยภาพ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เป็นพลังงานสะอาด จึงได้รับความสนใจในการศึกษาเป็นอย่างมากจนเกิดสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

สิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดย ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) กล่าวคือ พลังงานแสงหรือโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดีจะมีอายุการใช้งานยาวนานมากกว่า 20 ปี เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงมีเปอร์เซ็นต์การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อย จึงทำให้เป็นที่สนใจในการศึกษาเพื่อลดต้นทุนการผลิตและการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มสูงในการลดต้นทุนการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 ประสบความสำเร็จมากในตลาดสารกึ่งตัวนำเซลล์แสงอาทิตย์และเข้าสู่การผลิตขนาดใหญ่ ซึ่งบันทึกประสิทธิภาพที่ 21.7% ได้สำเร็จในปี พ.ศ.2014 (Kanai et al., 2015) สำหรับฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามเนื่องจาก In,Ga และ Se เป็นธาตุที่หายากและ Se เป็นพิษ ดังนั้นการผลิตขนาดใหญ่ในอนาคตจึงจะขึ้นอยู่กับ การหาวัสดุทดแทนที่มีราคาถูก ปลอดภัย และมีความอุดมสมบูรณ์ ในทางตรงข้ามกับสาร CIGS สารประกอบ Cu_2SnS_3 (CTS) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สมบูรณ์ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืน 10^4 ต่อเซนติเมตร มีช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน 1.1-1.35, 0.90-1.02 และ 0.93-1.75 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ เตตระโกนอล โมโนคลินิก และโครงสร้าง

ลูกบาศก์ตามลำดับ (Kanai et al., 2015) ดังนั้นจึงจัดว่าเป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสูง สำหรับใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

ในปี พ.ศ. 2530 มีรายงานเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ตัวแรกที่มีชั้นดูดกลืนแสงเป็น CTS เป็นการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดขอตต์กี มีประสิทธิภาพการแปลง 0.11% (Kanai et al, 2015) โดยใช้ฟิล์มบาง CTS ที่เตรียมโดยการระเหยโดยตรง

ในปี พ.ศ. 2554 ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่อิงกับ CTS โดยการระเหิด S เคลือบ มี Cu-Sn เป็นสารตั้งต้น (Kanai et al., 2015) และการระเหยสารตั้งต้น Cu/Sn เซลล์เหล่านี้มีประสิทธิภาพในการแปลงเท่ากับ 2.84 และ 2.54 ตามลำดับ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพให้มากกว่า 3% โดยใช้การระเหยร่วมและใช้เวลาในการอบสั้น (Kanai et al., 2015) ในปัจจุบันฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์ CTS ถูกประดิษฐ์โดยการระเหยร่วมใช้เวลาในการอบสั้นและได้ประเมินอัตราส่วนของ Cu/Sn แตกต่างกัน

ในโครงการพิเศษนี้สนใจที่จะเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ให้ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศให้เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
- 2) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เตรียมได้
- 3) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
- 4) เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เตรียมได้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 5) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เตรียมได้ โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้ จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เตรียมไว้ได้ และสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์และโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และสมบัติทางไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 4) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 5) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมโดยการวัดการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง
- 6) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลจากการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้เราทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำให้เราทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มบางว่ามีความเหมาะสมมาก ในการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ
- 3) ทำให้เกิดความคุ้นเคยและความชำนาญในการเตรียมฟิล์มบางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ

บทที่ 2

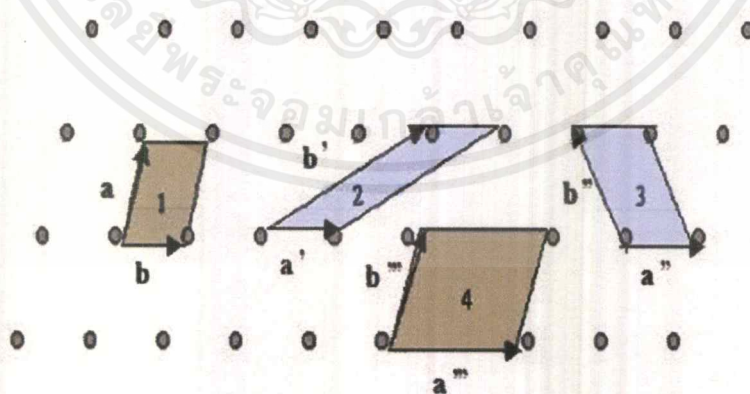
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



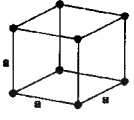
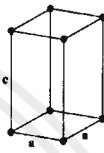
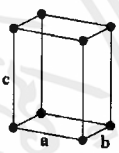

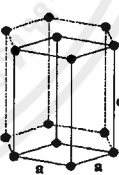
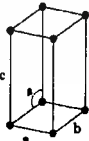
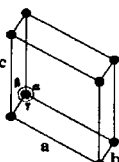
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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 มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธรอมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รมบโฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

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)	$a = b \neq c$ $\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก(Cullity, 1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; รัฐินัย, 2549; รัฐินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รัฐินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึงตำแหน่งทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

- 1) กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
- 2) การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[uvw]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
- 3) การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วย อะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้น ทำได้โดย

3.1) กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกน

ใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-)

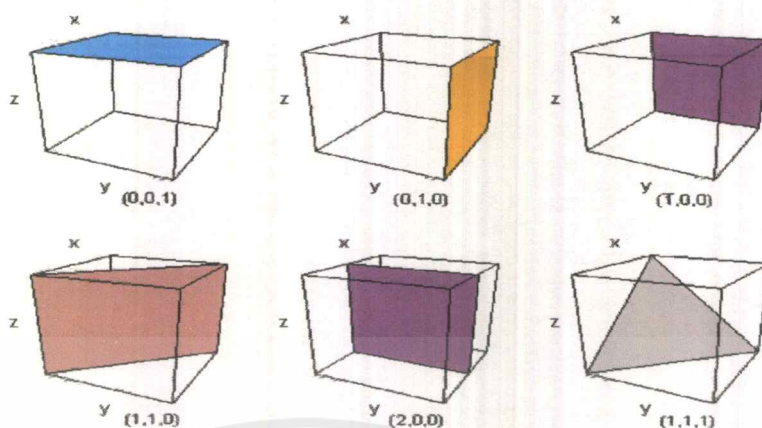
ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

3.2) ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

3.3) ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้

จาก ข้อ2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.2

และตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระนาบตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบนแกนผลึก	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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

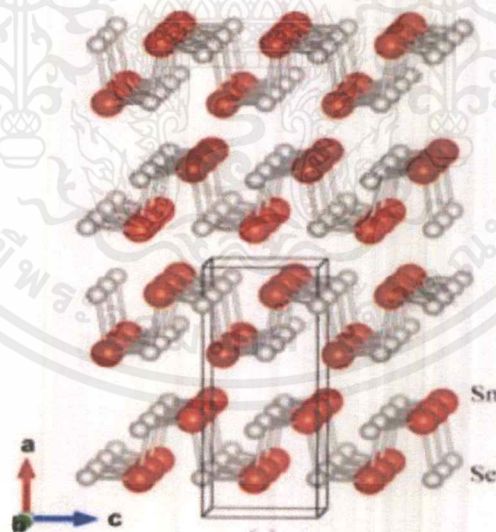
สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ในระบบเฮกซะโกนัลเฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ (สุกฤษณ์, 2547 ; ฐิตินัย, 2552 ; ฐิตินัย, 2555 ; งามนิศย์, 2556;)

ทินซีลีไนท์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตร SnSe ซึ่งดีบุกมีสถานะออกซิเดชัน +2 SnSe เป็นสารกึ่งตัวนำ (IV-VI) SnSe มีการนำความร้อนต่ำและมีการนำไฟฟ้าที่ดี เหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก สารประกอบ SnSe มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก

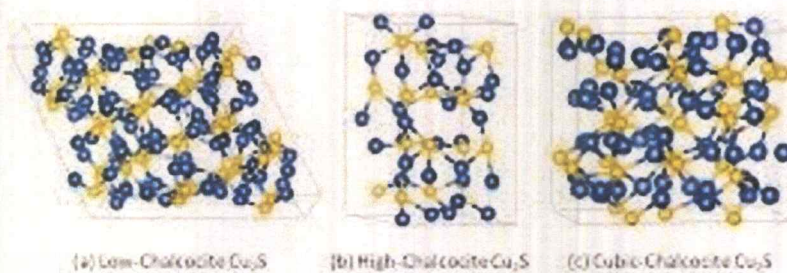


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึก SnSe

คอปเปอร์ซัลไฟด์มีสูตร Cu_2S ซึ่งอุดมไปด้วยอะตอมของธาตุ Cu^+ มากกว่า Cu^{2+} ไอออน Cu^+ สร้างพันธะกับไอออน S^{2-} สารประกอบ Cu_2S มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไซด์ (chalcocite) ซึ่งมีเฟสต่างกัน 3 เฟส กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 104 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้าง

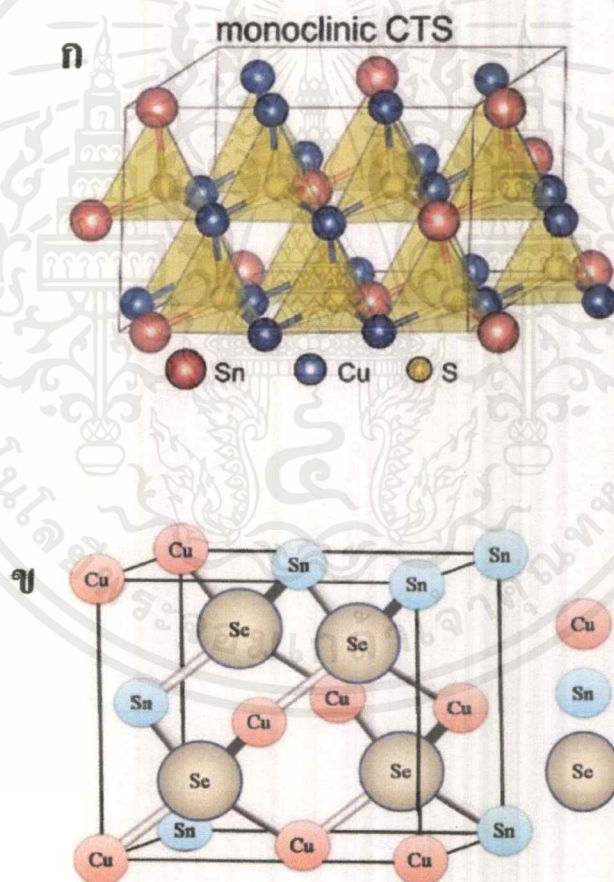
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกแบบโมนอกลิติก เปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนัลในช่วงอุณหภูมิ 104-436 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 436 โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นคิวบิก



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึก Cu_2S

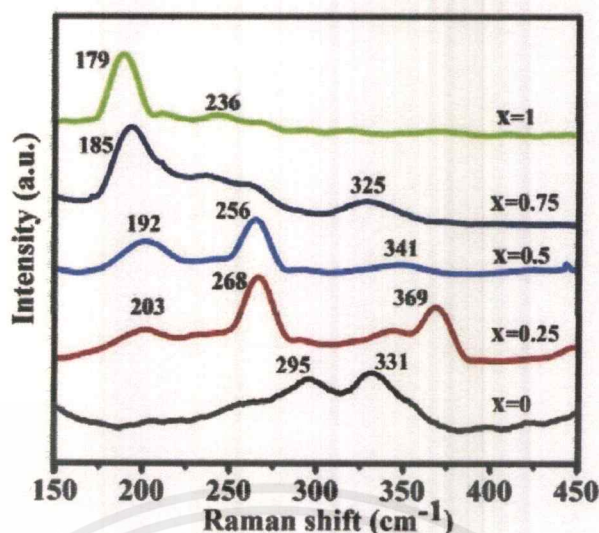
เมื่อนำสารประกอบ CuS ทำการผสมกับสารประกอบ SnSe ทำให้เกิดสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{Sn(S,S)}$



รูปที่ 2.5 แสดง (ก) โครงสร้างผลึกของ Cu_2SnS_3 และ (ข) โครงสร้างผลึกของ Cu_2SnSe_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุเฟสและการตกผลึกของ CTSSe มีโครงสร้างเป็นแบบ cubic ,tetragonal และ monoclinicฟิล์มบาง Cu_2SnS_3 เป็นโครงสร้างที่ได้รับ zincblende (ZnS : spacelกลุ่ม, F-43m) ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของเซลล์สุริยะวัสดุที่มีคุณสมบัติยอดเยี่ยมเช่น CIGS และ CZTS ในโครงสร้างที่ได้จาก Zincblende Cu^+ และ Sn^{4+} จะกระจายอยู่ใน Zn^{2+} ตำแหน่งที่จะครอบครองด้านหน้าเป็นศูนย์ cubic (fcc) sublattice,และอะตอม S หรือ Seครอบครอง sublattice อื่น ๆ ในเซลล์ หน่วยของโครงสร้างที่ได้รับ zincblende มันคง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนไหวและสมบัติการขนส่งในระบบ CTS (Se) ตาข่ายดีซันซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีเยี่ยม โครงสร้างผลึกมีอัตราส่วน $\text{Se} / (\text{S} + \text{Se})$ แตกต่างกัน ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$) รูปที่ 2.5(ก) จุดสูงสุดที่ $28.60^\circ (27.17^\circ)$, $47.52^\circ (45.08^\circ)$ และ $56.36^\circ (53.44^\circ)$ สอดคล้องกับ (111) ,(220) และ (311) ของ CTSรูปที่ 2.5(ข) และ CTSeรูปที่ 2.5(8) ตามลำดับ ผลจากการวิจัยชี้ว่า CTSSe มีอัตราส่วนต่างกันของ $\text{Se} / (\text{S} + \text{Se})$ โครงสร้างแบบ Cubicมี สิ่งเจือปนเช่น CuS , Cu_2S จะไม่พบ SnS , SnS_2 หรือ Cu_3SnS_4 ยกเว้นการเลี้ยวเบนสูงสุดที่ 31.4° สำหรับ $x = 1$ ซึ่งตรงกับ (101) ระนาบของ Se ซึ่งมาจากส่วนเกินของวง Se ในสารตั้งต้น นอกจากนี้รัศมีไอออนของ S^{2-} (1.84 Å) มีขนาดเล็กกว่าของ Se^{2-} ไอออน (1.98 Å) เมื่อสัดส่วนของอะตอมของธาตุ S ถูกแทนที่ด้วย Se อะตอมจะเพิ่มระยะห่างการตั้งฉากระหว่างระนาบของอะตอมในคริสตัลลดมุมการเลี้ยวเบน 2θ ดังนั้นการกระจายตัวของจุดสูงสุดในการวิเคราะห์ด้วย XRD เปลี่ยนไปสู่มุมลดหลั่นที่มีอัตราส่วนของ $\text{Se} / (\text{S} + \text{Se})$ เพิ่มขึ้น ระยะห่างของระนาบ (111) เพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงโดย x เพิ่มขึ้นเมื่อ $x = 0, 1$ ระยะห่างการตั้งฉากระหว่างระนาบของอะตอมในคริสตัล ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 3.18 ± 0.05 และ 3.29 ± 0.08 Åซึ่งสอดคล้องกับ (111) ของระนาบ Cu_2SnS_3 และ Cu_2SnSe_3 ตามลำดับ นอกจากนี้ตาข่ายระยะห่างระหว่างระนาบ (111) อยู่ที่ 3.21 ± 0.03 , 3.26 ± 0.02 และ 3.28 ± 0.02 Åเมื่อ x เท่ากับ 0.25, 0.5, 0.75 ตามลำดับ แสดงว่าระยะห่างระหว่างระนาบของ (111) เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มของ Se ซึ่งเป็นผลมาจากการโตขึ้นของตาข่ายคริสตัลจากการแทนที่ของรัศมีไอออนขนาดใหญ่ของ Se^{2-} (1.98 Å) สำหรับรัศมีไอออนขนาดเล็กของ S^{2-} (1.84 Å) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงการเลี้ยวเบน ใน XRD ของฟิล์มบาง CTSSe(รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรามันของ CTSSe NCs ที่มีองค์ประกอบของ x ต่างกัน

Raman spectram ทำการตรวจสอบข้อมูลของการสั่นสะเทือนของโมเลกุลและการหมุนของ CTSSe มีอัตราส่วน S และ Se แตกต่างกันรูปที่ 2.6. สำหรับ CTSe จุดสูงสุดที่โดดเด่นอยู่ที่ 179 cm^{-1} และ $236-179\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่จุดสูงสุดสองแห่งเด่นชัดอยู่ที่ 295 cm^{-1} และ 331 cm^{-1} เป็นของ CTS [16,39,40] เมื่อ x เท่ากับ 0.25 จุดสูงสุดทั้งสองโดดเด่นอยู่ที่ 268 cm^{-1} และ 369 cm^{-1} ขณะที่จุดสูงสุดที่ 203 cm^{-1} ค่อนข้างน้อย เมื่อ x เท่ากับ 0.5 จุดสูงสุดทั้งสองที่ตั้งอยู่ที่ 192 cm^{-1} และ 256 cm^{-1} ในขณะที่ยอด 341 cm^{-1} น้อยกว่าจุดสูงสุดสองข้างต้น หากเพิ่ม Se ให้ มีจุดสูงสุดทั้งสองที่โดดเด่นที่ 185 cm^{-1} และ 325 cm^{-1} จุดสูงสุดในช่วงจาก 230 cm^{-1} ถึง 256 cm^{-1} จะไม่ชัดเจน สำหรับ $x = 0.75$ เป็นไปตาม Raman spectram ของ CTSSe จุดสูงสุดที่โดดเด่นแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของ Se นอกจากนี้มีจุดสูงสุดของสิ่งที่ไม่เจือปนเช่น CuS , Cu_2S , SnS , SnS_2 หรือ Cu_3SnS_4 ไม่ได้รับการตรวจสอบซึ่งยืนยันว่า CTSSe ที่เตรียมไว้มีความบริสุทธิ์

2.3 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

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

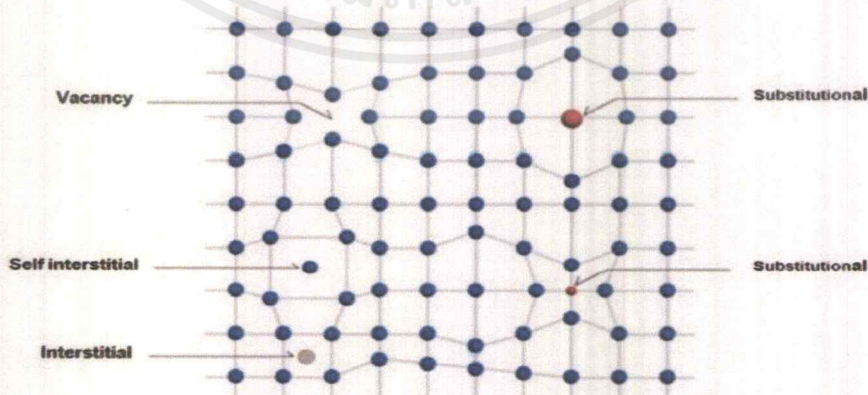
2.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

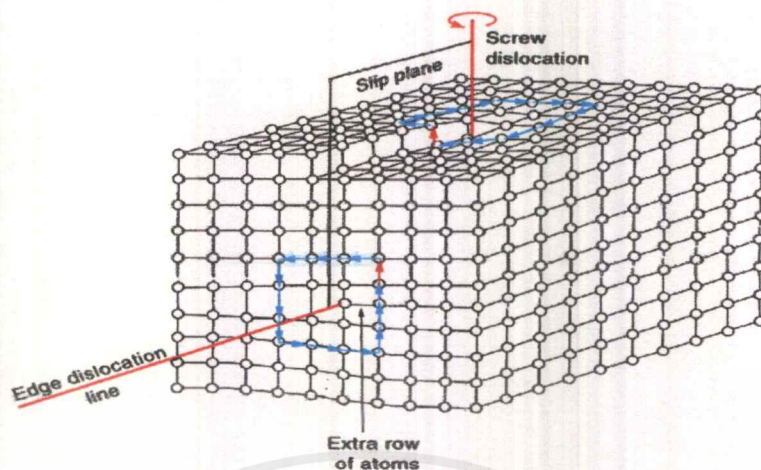
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล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

2.3.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7

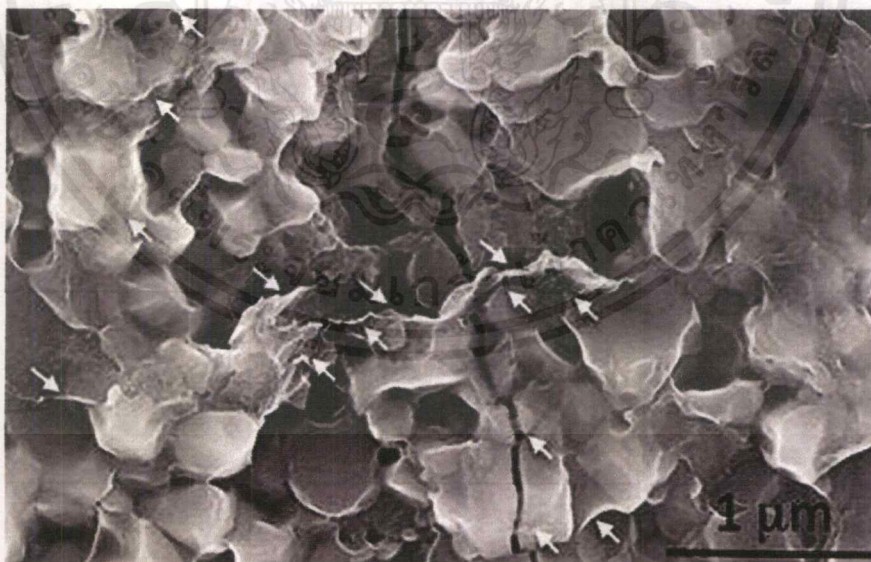


รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.9 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆคือการเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

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

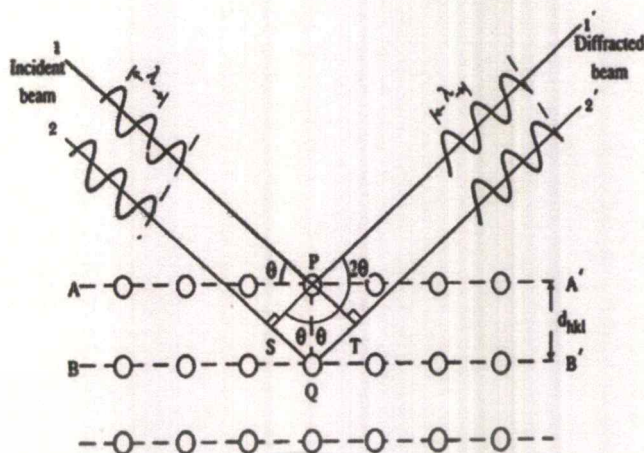
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

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

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.10

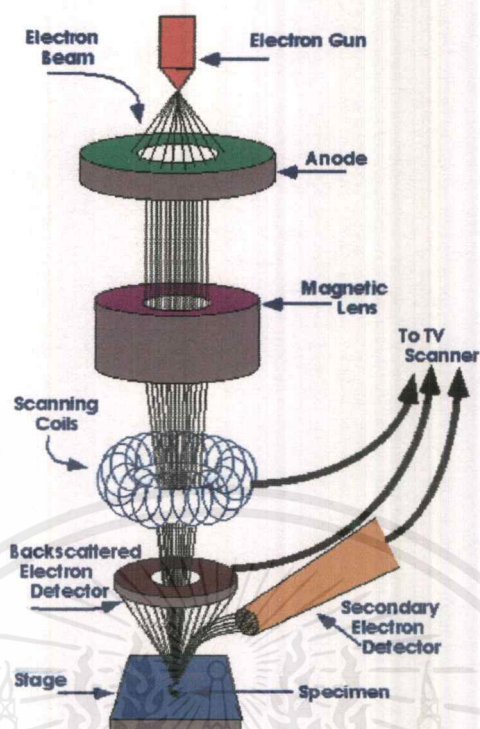


รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

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

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.11 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน FESEM

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผกผันตรงกับ i_p แต่แปรผกผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

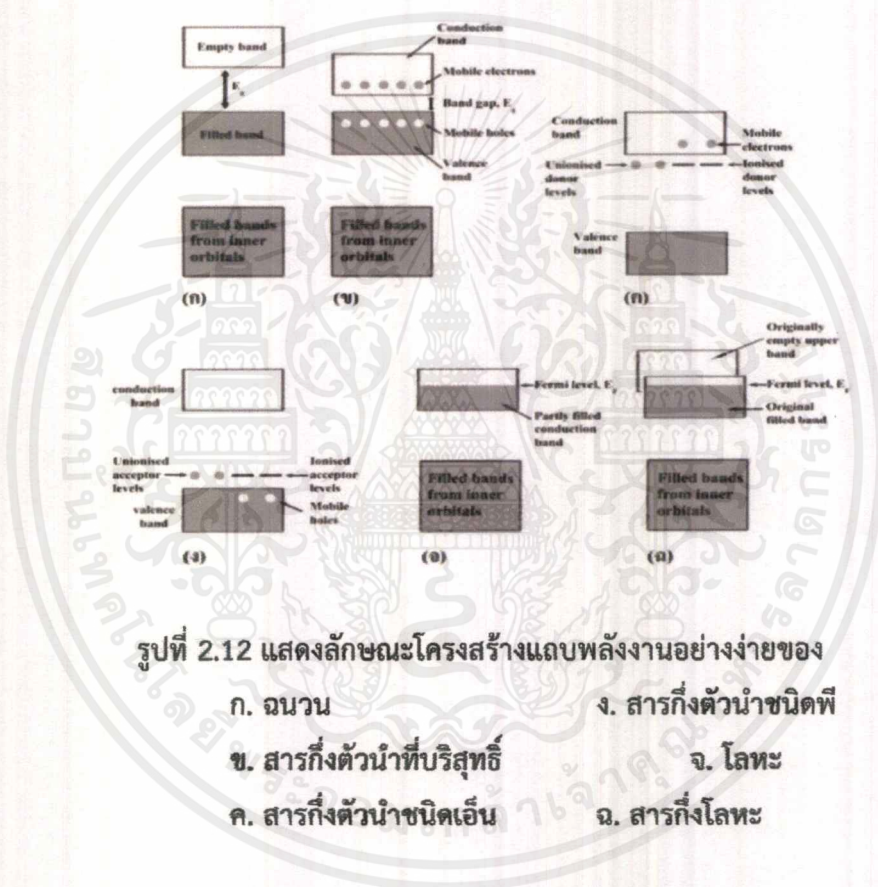
2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap: E_g) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

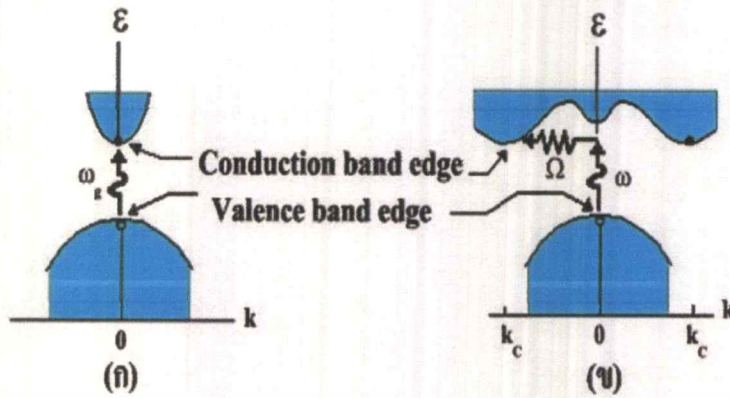
ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อีก 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำ กับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ $E_g = k$ มากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกรูปนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ

อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ จะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำ แล้วบางส่วนรูปที่ 2.12 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.12(ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.13(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

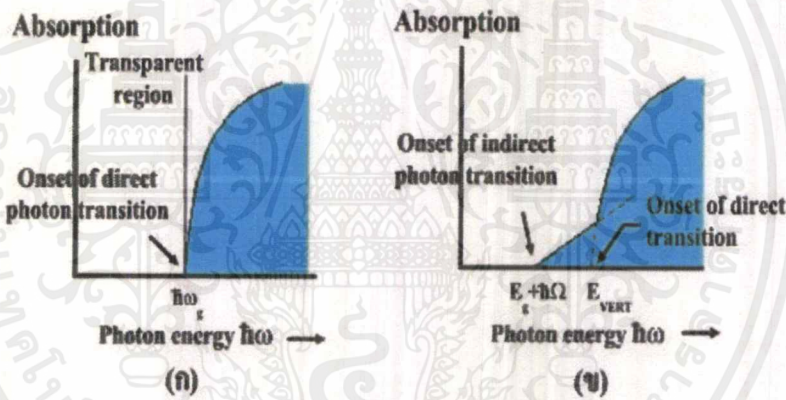


รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน

อิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



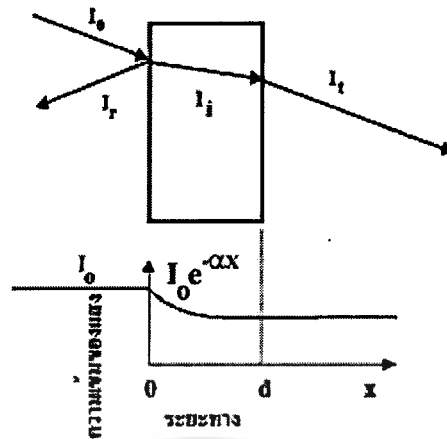
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.6.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550)

พิจารณาการศึกษาชีวิตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

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

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R) I_0 \quad (2.4)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิทย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา 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 $n_c = n - iK$ (2.9)

เมื่อ n คือ จำนวนจริง

K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียชีวิต (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (งามนิทย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

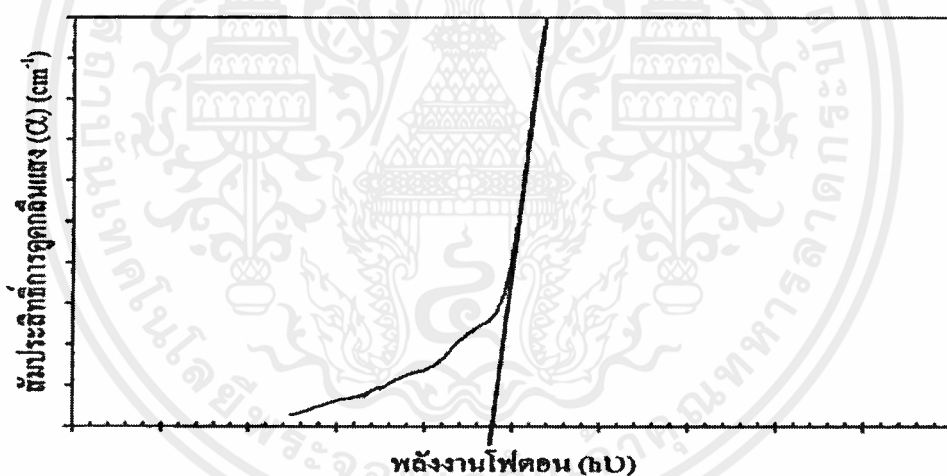
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่า

เท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (l_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

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

จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกรายการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยวม และชนิดต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

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

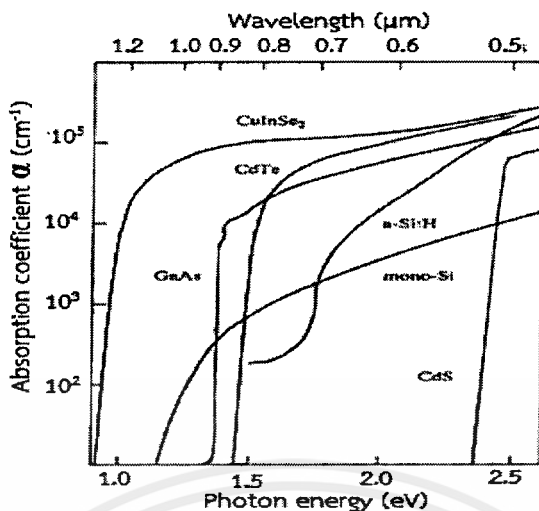
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.7 พูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) (งานนิศย์, 2545;ฐิตินัย, 2549;ฐิตินัย, 2550;งานนิศย์, 2551;ฐิตินัย, 2551)

FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบ โครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออนของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงตามองเห็นได้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)
2. Middle Infrared (4000-200 ต่อเซนติเมตร)
3. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงานความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.15)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.15)$$

เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทริกสิกเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

2.8.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

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

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.16)$$

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณี que แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_c(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.17)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

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

จากสมการที่ (2.17) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_i} n(E) dE = \int_0^{E_i} N_c(E) f(E) dE \quad (2.18)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกหลายๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.18) จึงสามารถขยายของเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.18) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{3/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.19)$$

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

$$n_i = N_c \exp \left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.20)$$

เมื่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp \left[-\frac{E_F + E_g}{kT} \right] \quad (2.22)$$

โดย

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

(2.23)

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_v คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.23) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.24)$$

และ

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.25)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right) \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.28) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซิโพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.8.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) และอะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิง

ความร้อนของผลึกความหนาแน่นอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.27)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.28)$$

จะได้กฎการคงตัวของมวลตั้งสมการ

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

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

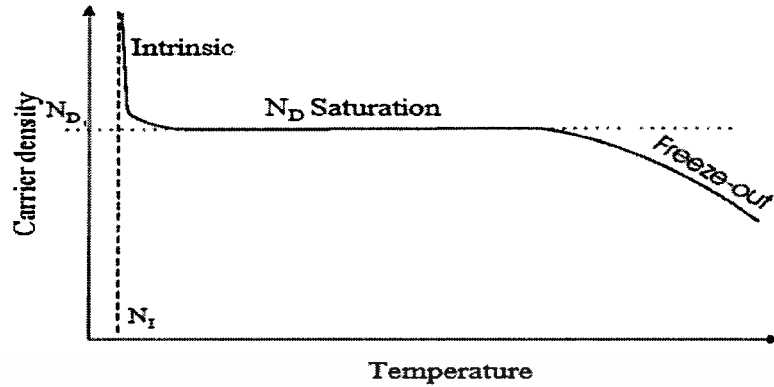
$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.30)$$

เมื่อ n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานความร้อน พหุหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.30) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.32)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.33)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพหุหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.30) และ (2.31) จะกลายเป็นสมการของบริเวณย่านอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.34)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีค่าน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะช่องมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.31) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.35)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และ อะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.35) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.36)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.37)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.34), (2.35) และ (2.36) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.37) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \quad (2.38)$$

เมื่อ

$$N_c' = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.39)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการ คือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N_c') + \frac{1}{2}[(N_d + N_c')^2 + 4N_c'(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.40)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N_c' จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.40) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

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

$$n \cong \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} \quad (2.41)$$

ถ้า $N_a \gg N_c'$ สมการที่ (2.41) จะกลายเป็น

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

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

จะเห็นว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่า ฟรียเออท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.41) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.43) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.9 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551);

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

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.44)$$

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

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.45)$$

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

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.46)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.47)$$

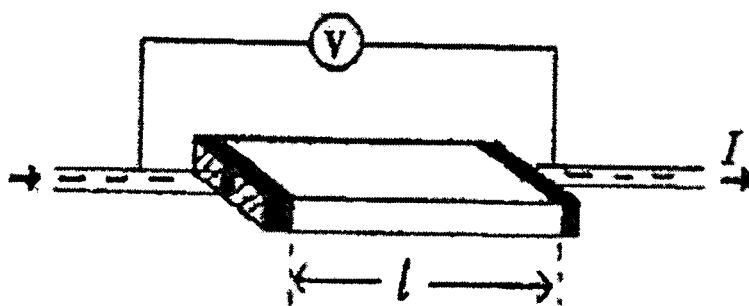
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.10 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.10.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่นแท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.48)$$

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

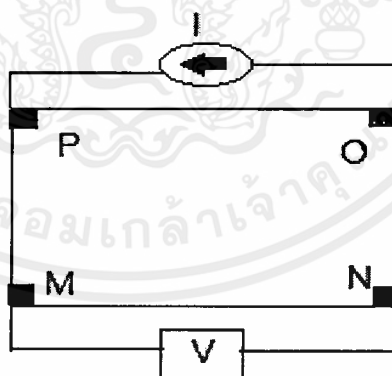
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.10.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินันย์, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและ สภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.50)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.50)$$

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

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.51)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.52)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.53)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.54)$$

2.11 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.55)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.56)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

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

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.58) และ (2.59) คือ

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

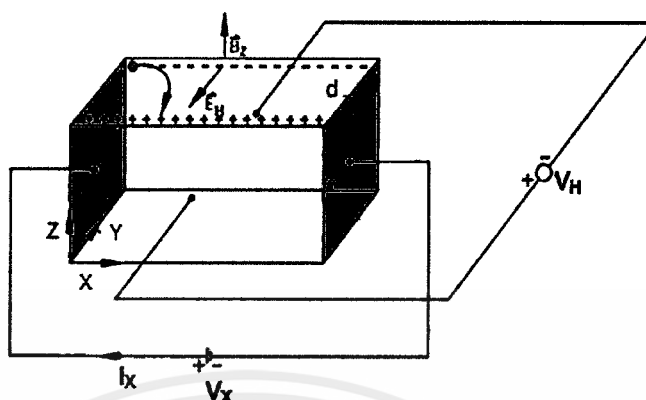
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.58)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.60)

จาก
$$I = nqvA \quad (2.60)$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.61)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.62)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.63)$$

จากรูปที่ 2.22
$$A = w \cdot d \quad (2.64)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) และ (2.64)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.65)$$

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

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.66)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโมลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โมลเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.67)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.67) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.68)$$

เมื่อ $J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.69)$

แล้ว $R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.70)$

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.71)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.72)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.73)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.74)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.75)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.76)$$

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

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.77)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตาม

สนามแม่เหล็กและอนุทงุมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.78)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่จากสมการที่ (2.72) และ (2.73) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.79)$$

หรือจากสมการที่ (2.73) และ (2.78)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.80)$$

ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

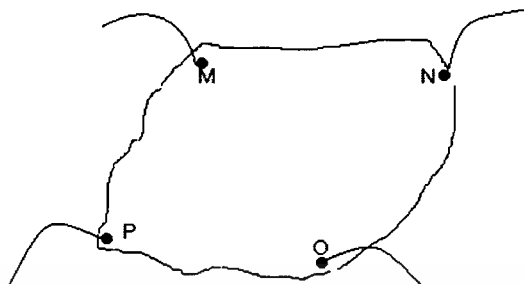
2.11.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปีง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สำระสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

นิยาม
$$R_{MNO P} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.81)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.82)$$

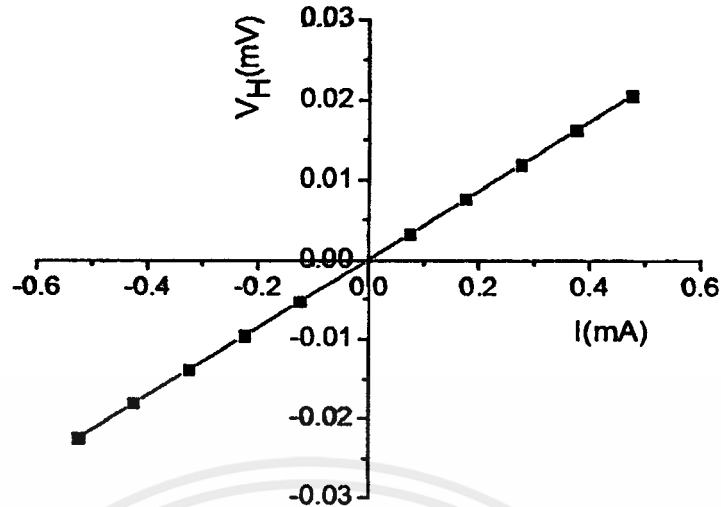
เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.81) จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้

จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.24 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.84)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.85)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

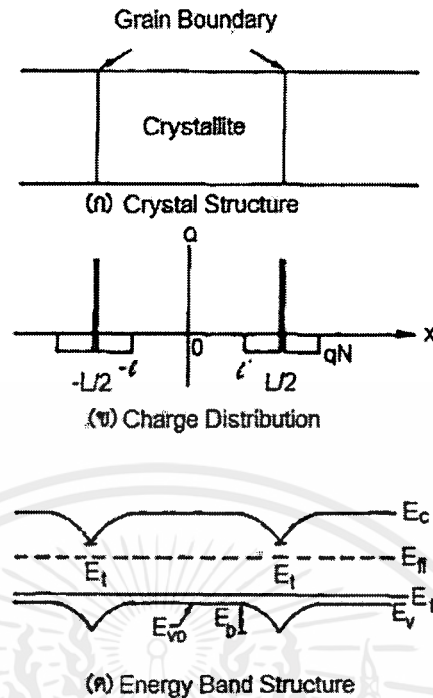
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ

- ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
- ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
- ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

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

2.12.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มี (E_f) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_t สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.86)$$

เมื่อ
$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.87)$$

และ
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.88)$$

สมการที่ (2.89) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.89)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.90)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.91)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.92)$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.93)$$

โดยที่ E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) สำหรับ ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ N_v สามารถหาได้จากสมการที่ (2.84) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.94)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.95)$$

ส่วนระดับพลังงานของกักตักพาหะ(E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.96)$$

2.12.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

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

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.97)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.97) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.98)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.99)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.100)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.101)$$

$$E_a = -\frac{1,000(k)(\text{ความชัน})}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.102)$$

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.103)$$

เมื่อ ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al., 2011) จากสมการที่ (2.102) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับกับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.102) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

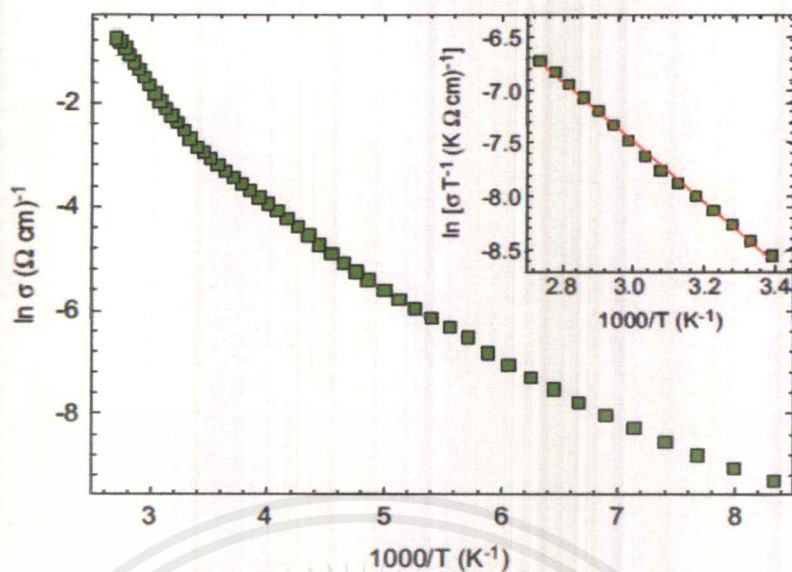
$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.104)$$

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

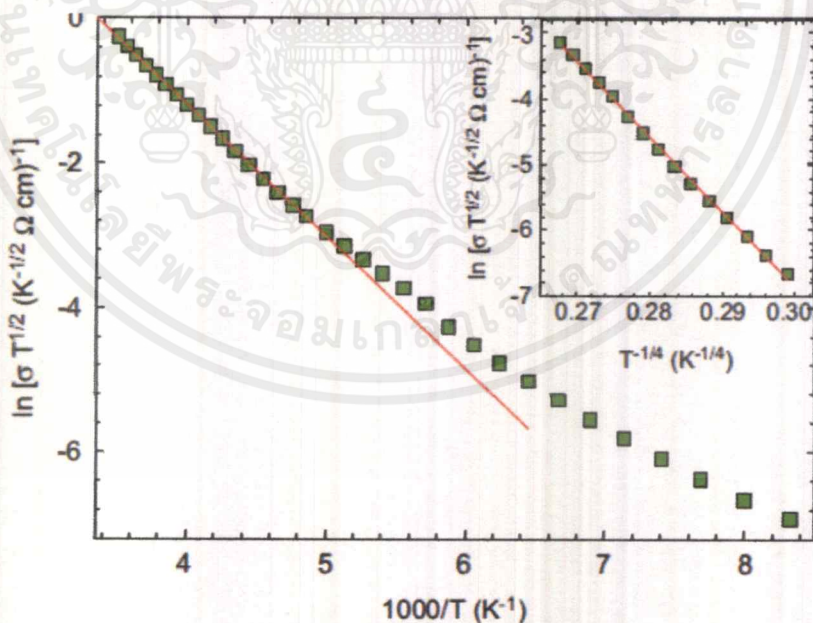
$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_a^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kTN_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.105)$$

ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.106)$$



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)



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย์, 2555; ฐิตินัย, 2556)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.107)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.108)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.109)$$

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

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.108) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ

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

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi a k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.110)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.111)$$

เมื่อ V คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์

$N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (density of localized states at Fermi level)

α คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มิ (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 (2.110) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.112)$$

เอาสมการที่ (2.111) คูณกับสมการที่ (2.112) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.113)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.114)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.115)$$

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

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.116)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.115) ลงในสมการที่ (2.114) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^2 k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.117)$$

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.118)$$

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตรและค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi a k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.119)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.120)$$

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

$$N(E_F) = \left(\frac{2e_S}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.121)$$

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

2.13 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว (single oscillator model)

หลักการพื้นฐานของการกระตุ้นทางแสงของวัสดุสามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงที่ไดโพลีกริกเชิงซ้อน $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$ ซึ่งมีค่าขึ้นกับค่าความถี่ของแสง พารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญต่างๆ ของวัสดุจะปรากฏอยู่ในพจน์จำนวนจริง $\epsilon_1(\omega)$ หรือไม่ก็พจน์ที่เป็นจำนวนจินตภาพ $\epsilon_2(\omega)$ โดยที่พจน์ $\epsilon_1(\omega)$ และพจน์ $\epsilon_2(\omega)$ ซึ่งจะสัมพันธ์กันดังปรากฏในทฤษฎีของเครเมอร์-โครนิค [(Kramer-Kronig (K-K theory))] ดังนี้คือ

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.122)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{-2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

โดยที่ P คือค่าส่วนหลัก (principal part) สำหรับในวัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่านโปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_c \quad (2.123)$$

เมื่อ ω_c คือ ความถี่ขีดเริ่ม และ $\epsilon_1 = n^2$ สำหรับความถี่ ω นี้จะกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งหมด จากสมการที่ (2.123) ค่าดัชนีหักเหสามารถหาได้จากการอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ถึงแม้ว่ากระบวนการคำนวณหาค่า $\epsilon_2(\omega)$ จะอยู่ในกรอบของทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียว (one electron band theory of solids) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลินโซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีแนวโน้มคลุมเคลือขึ้นกับรายละเอียดของการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายังวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิกเทน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อบินยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap; E_g) ในขณะที่ เวมเฟิล-โดโดเมนนิโค ใช้ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแสง เพื่อบินยามพารามิเตอร์ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (dispersion energy; E_d) พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์มากเนื่องจากสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายได้และใช้ได้ดีกับสารประกอบจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสมการความสัมพันธ์เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือจะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกและความเป็นไอออนิกของผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะสมบัติของค่าดัชนีหักเหของวัสดุของแข็งต่างๆ

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา (time dependent perturbation theory) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} \int_{BZ} d^3k \frac{f_{ij}^\alpha(\vec{k})}{(\omega_{ij}^2(\vec{k}) - \omega^2)} \quad (2.124)$$

ซึ่ง e และ m คือประจุและมวลของอิเล็กตรอน ทำการหาค่าผลรวม (summation) ครอบ คลุมทุกแถบพลังงาน i และ j โดยที่ $i \neq j$ และทำการอินทิเกรตตลอดทั่วทั้งบริลลินโซน สำหรับ $f_{ij}^\alpha(\vec{k})$ คือความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงแรงแรงของออสซิลเลเตอร์ของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงาน i และ j ในทิศทางโพลาไรซ์ค่า α จากสมการที่ (2.123) สามารถทำการประมาณได้สองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าทำการทดลองวัดได้จริง โดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาถึงความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสงเช่นในย่านที่มีความถี่ในช่วง $\omega < \omega_{ij}$

เพนน์ (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยการใช้แบบจำลอง อิเล็กตรอนอิสระในแบบไอโซโทรอปิกที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ถ้าประมาณให้ $\hbar\omega_{ij} \approx E_g$ แล้วสมการที่ (2.123) จะกลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum_{i,j} \int_{BZ} d^3 k f_{ij}^\alpha(\vec{k}) \quad (2.124)$$

และ
$$\sum_j \int_{BZ} d^3 k = 4\pi n_v \quad (2.124)$$

เมื่อ n_v คือค่าความหนาแน่นยังผลของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ (effective density of valence electrons) แล้วสมการที่ 2.124 จะลดรูปได้เป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{(\hbar\omega_p)^2}{E_g^2} \quad (2.125)$$

เมื่อ $\omega_p^2 = 4\pi n_v e^2 / m$ คือค่าความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่สูง ถ้ากำหนดให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีอย่างละหนึ่งแถบ (single group of valence and conduction band) แล้วสมการที่ (2.123) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi^2}{m\Omega} \sum_k \frac{f_{cv}^\alpha(\vec{k})}{\omega_{CV}^2(\vec{k}) - \omega^2} \quad (2.126)$$

เมื่อ Ω คือปริมาตรของผลึก ส่วน c และ v คือแถบนำและแถบวาเลนซ์ ถ้าประมาณว่าการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำในบริลันโซนเกิดเป็นออสซิลเลเตอร์และอิเล็กตรอนวาเลนซ์หนึ่งตัวจะทำให้เกิดเป็นออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว ดังนั้นจะประมาณสมการที่ (2.126) ได้ว่าเป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_n \frac{f_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (2.127)$$

เมื่อ f_n คือ ค่าความเชิงแรงแรงของออสซิลเลเตอร์ของไดโพลทางไฟฟ้าที่สังสรรค์กับการย้ายสถานะพลังที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n การหาผลรวม (summation) ให้ครอบคลุมทุกออสซิลเลเตอร์

ที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n (โดยที่ $\omega < \omega_n$) สามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งส่วนแรกคือ ออสซิลเลเตอร์ตัวที่หนึ่งซึ่งมีค่า $f_1/(\omega_1^2 - \omega^2)$ และส่วนที่สองคือ

$$\sum_{n \neq 1} (f_n / \omega_n^2) (1 + \omega^2 / \omega_n^2)$$

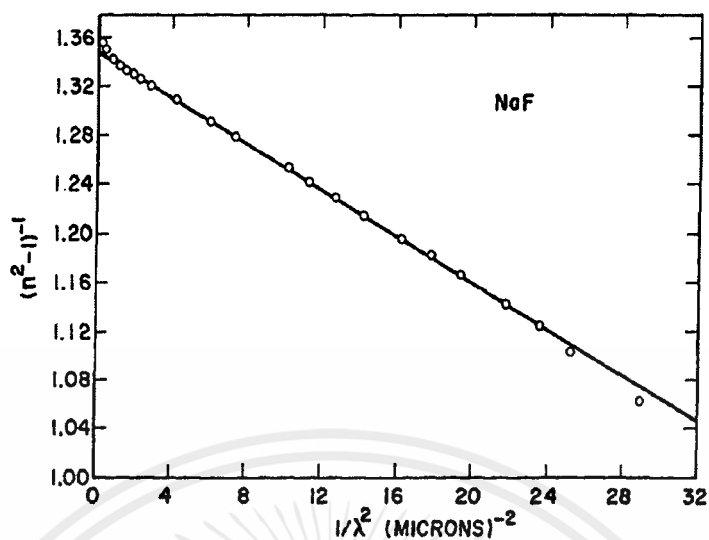
ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกันโดยที่ยังคงรักษาพจน์ ω^2 จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยวมีค่าดังนี้คือ

$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{E_0^2 - (\hbar\omega)^2} \quad (2.128)$$

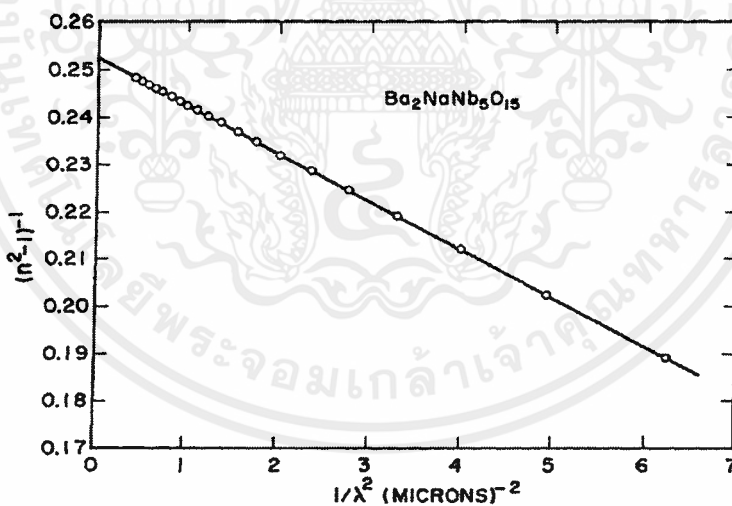
ซึ่งพารามิเตอร์ E_0 และ F จะสัมพันธ์กับ f_n และ ω_n ของสมการที่ (2.127) จากสมการที่ (2.115) จะทำให้สามารถประมาณหาค่าพารามิเตอร์สองตัวได้ที่พลังงาน $\hbar\omega < \hbar\omega_c$ สมการที่ (2.115) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องดีกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์ E_0 และ F ที่ได้จากผลการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆได้หรือไม่ แวมเพิล-โดโดเมนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนต์ของสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะอีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $E_d = F/E_0$ ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.128) สามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) ดังนี้คือ

$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_0}{E_0^2 - (\hbar\omega)^2} \quad (2.129)$$

จากสมการที่ (2.129) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ω^2 แล้วจะได้ค่าความชันคือ $1/E_d E_0$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ E_0/E_d ตัวอย่างสมการที่ (2.129) ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF, $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ และ CdS จะแสดงดังรูป 2.28-2.30 ที่ความยาวคลื่นยาว (long wavelength) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของเลตทิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับกรณีที่มีความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ดังปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

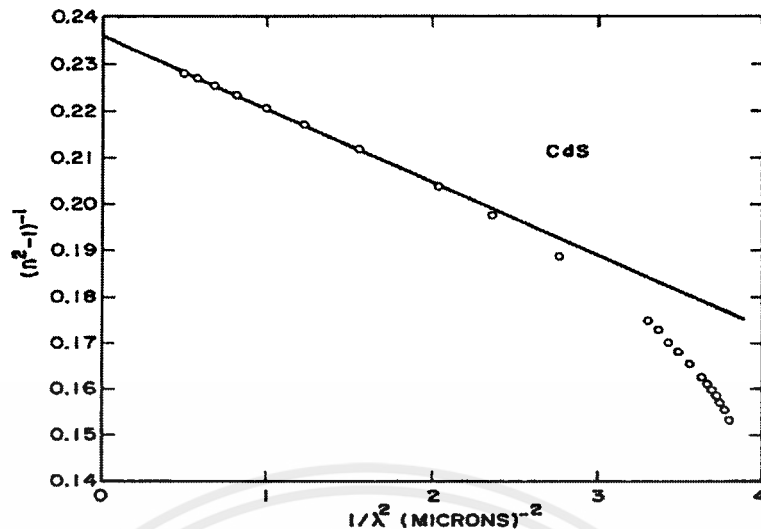


รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ Ba₂NaNb₅O₁₅

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างค่าพารามิเตอร์ E_0 กับ E_d ของออสซิลเลเตอร์เดียวกับสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้จากสมการที่ (2.106) กับสมการที่ (2.107) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่ r ของค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสงดังนี้คือ

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_i}^{\infty} E^r \epsilon_2(E) dE \quad (2.130)$$

เมื่อ $E \equiv \hbar\omega$ ส่วน E_i คือค่าพลังงานดูดกลืนแสงขีดเริ่ม ค่าพารามิเตอร์ E_0 และ E_d จะสัมพันธ์กับค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสงดังนี้คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.131)$$

และ

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (2.132)$$

พลังงานออสซิลเลเตอร์ E_0 จะไม่ขึ้นกับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_0 นี้คือค่าเฉลี่ยของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในขณะที่ E_d จะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_d จะทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ เนื่องจากโมเมนต์ที่ M_{-1} กับ โมเมนต์ที่ M_{-3} จะเกี่ยวข้องกับ E_0 และ E_d การให้น้ำหนักแก่ค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ จะมีค่า

เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าใกล้ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.133) และ (2.134) กับสมการที่มีปริมาณ $\hbar\omega_p$ และ E_g ของแบบจำลองฟิลิปส์แล้วพบว่า

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (2.133)$$

และ
$$E_g^2 = \frac{M_1}{M_{-1}} \quad (2.134)$$

ดังนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิลิปส์ (E_g) คืออัตราส่วนของโมเมนต์ที่ M_1 ต่อโมเมนต์ M_{-1} (ดังสมการที่ (2.134)) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา M_1 แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้ M_{-1}^2/M_{-3} เพื่ออธิบายความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ que แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์และโฮปฟิลด์ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ E_a โดยนิยามว่า

$$E_a^2 = M_3 / M_1 \quad (2.135)$$

และแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงาน E_a นี้ จะสัมพันธ์กับค่าอินทิกรัลของผลคูณระหว่างค่าลาปลาเซียนของศักย์ไฟฟ้าของผลึกกับความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่า E_0 , E_g และ E_a จะแสดงความสมมาตรได้อย่างชัดเจนดังสมการที่ (2.131), (2.134), (2.135) และยังแสดงให้เห็นว่า

$$E_t < E_0 < E_g < E_a \quad (2.135)$$

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในวัสดุตัวกลาง (media) อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมจะโผลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนแกนกลาง (ion core) โดยประมาณว่าทุกๆ อะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลตอร์ชนิดเดียวกันก็เพียงพอจากแบบจำลองของเวมเพิลและไดโดเมนนิโค (Wemple - Di-Domenico) ในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องแถบพลังงาน ฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหจะแสดงดังสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (h\nu)^2} \quad (136)$$

$$\text{หรือ} \left(\frac{1}{n^2 - 1} \right) = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2 \quad (2.137)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.137) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (2.138)$$

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.139)$$

จากสมการที่ (2.139) และ (2.140) สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (2.140)$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

N_c = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

Z_a = ค่าวาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

N_e = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

และ $f = E_0 E_d$ คือค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่ r ของสเปกตรัมทางแสง (r^{th} moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ $E_0 E_d$ ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.141)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (2.142)$$

เมื่อ M_{-1} และ M_{-3} คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมนต์ลำดับที่ M_{-1} และ M_{-3} ตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (2.143)$$

เมื่อ

$$n^* = n - ik \quad (2.144)$$

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.145)$$

โดยที่ $\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.146)$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.147)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

เมื่อ $\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0 \quad (2.148)$

และ $\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0 \quad (2.112)$

2.14 ค่าคงที่ได้โอเล็คทริกสเปกโทรสโกปี (dielectric spectroscopy)

2.14.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model)

อิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กทริกจะยึดเหนี่ยวด้วยแรงคูลอมบ์อยู่กับไอออนคอร์ (ion core) ของแลตทิซ (lattice) เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะกวัดแกว่ง (oscilate) รอบตำแหน่งสมดุลในแบบฮาร์มอนิก ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัมจะหมายถึงอิเล็กตรอนมีการทรานซิชันจากระดับพลังงานค่าหนึ่งไปยังระดับพลังงานอีกค่าหนึ่ง ในกลศาสตร์แผนเดียมจะประมาณว่าออสซิลเลเตอร์เป็นแบบหน่วง (damped oscillator) ซึ่งแรงหน่วงนี้เกิดจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ เป็นต้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กทริกจะมาจากแรงคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แรงคืนตัวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนคอร์ และแรงหน่วงเนื่องจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ จากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$\sum F = m\ddot{x} = -\beta\dot{x} - k_s x - eE_x \quad (2.149)$$

สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ

$$E_x = E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.150)$$

แทนสมการที่ (2.149) ลงในสมการที่ (2.150) จะได้

$$x'' + \gamma x' + \omega_0^2 x = \frac{-e}{m} E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.151)$$

เมื่อ $\beta = \gamma m$ โดยที่ γ คือแฟกเตอร์การหน่วง (damping factor)

k_s คือค่าสปริง

เมื่อ $k_s = \omega_0^2 m$ โดยที่ ω_0 คือความถี่กำทอนของตัวออสซิลเลเตอร์

m คือมวลของอิเล็กตรอน

สมการคำตอบของค่าการกระจัดของออสซิลเลเตอร์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$x(t) = A \exp(-i\omega t) \quad (2.152)$$

แทนสมการที่ (2.152) ลงในสมการที่ (2.151) จะได้ว่า

$$A = \frac{-eE_0}{m} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right) \quad (2.153)$$

สมการที่ (2.152) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$x(t) = \left[\frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \right] \exp(-i\omega t) \quad (2.154)$$

ไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัว เรียกว่า ค่าโพลาริเซชันของออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว จะมีค่าดังนี้คือ

$$P = -ex = \frac{e^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.155)$$

ค่าโพลาริเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีค่า

$$P = Nex = \frac{Ne^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} = \left[\frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right] \epsilon_0 E \quad (2.156)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} = \text{ความถี่พลาสมา} \quad (2.157)$$

และ N คือ จำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือคือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
ค่าโพลาไรเซชัน ยังสัมพันธ์กับ ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.158)$$

จากสมการที่ (2.155) และ (2.158) จะได้ว่า

$$\chi = \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.159)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ^*) จะสัมพันธ์กับค่า χ ดังนี้

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi = 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \quad (2.160)$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (2.161)$$

$$\epsilon' = \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \quad (2.162)$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega_p^2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \quad (2.163)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าดัชนีหักเห (n^*) จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} = n + ik \quad (2.164)$$

$$\text{โดยที่} \quad n^2 - k^2 = \epsilon' \quad (2.165)$$

$$2nk = \epsilon'' \quad (2.166)$$

เมื่อ n และ k คือ ค่าดัชนีหักเห และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวกลาง สำหรับใน
กลศาสตร์แผนเดิม ω_0 คือ ค่าความถี่กำหนดของออสซิลเลเตอร์ที่กวัดแกว่งแบบฮาร์มอนิก อย่างง่าย
หนึ่งตัวแต่สำหรับกลศาสตร์ควอนตัม ω_0 จะสอดคล้องกับผลต่างของระดับพลังงานตอนสุดท้ายกับ
ระดับพลังงานตอนต้น สำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว (multiple oscillator) ค่าคงที่ไดอิ
เล็กตริกเชิงซ้อน คือ $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi$ ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon^* = 1 + \omega_p^2 \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.167)$$

เมื่อ f_j คือ ค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) ซึ่งหมายถึงอิเล็กตรอน f_j ตัวที่มีความถี่ ω_j และ แฟกเตอร์การหน่วง γ_j ในแต่ละโมเลกุลและจะสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งโมเลกุล (z) ดังนี้ คือ

$$\sum_j f_j = z \quad (2.168)$$

นิยมเรียกสมการที่ (2.167) ว่าเป็นสมการของแบบจำลองลอเรนตซ์ (Lorentz model) จากสมการที่ (2.167) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\varepsilon^* = 1 + \frac{Nq^2}{m\varepsilon_0} \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.169)$$

โดยทั่วไปแล้วในส่วนที่เป็นจินตภาพ $i\omega\gamma_j$ จะไม่มีความสำคัญมากนัก แต่ทว่าในกรณีที่ ω มีค่าเข้าใกล้ ค่าความถี่ ω_0 ในส่วนจินตภาพจะกลับมามีผลอย่างมาก ดังที่จะแสดงต่อไปนี้

กรณีที่เป็นตัวกลางดิสเพอร์ชัน (dispersion medium) สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ใดๆคือ

$$\nabla^2 \tilde{E} = \tilde{\varepsilon} \mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} \quad (2.170)$$

จะได้สมการของคลื่นระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.171)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าเลขคลื่น (\tilde{k}) คือ

$$\tilde{k} \equiv \sqrt{\tilde{\varepsilon} \mu_0 \omega} \quad (2.172)$$

เมื่อเขียน \tilde{k} อยู่ในพจน์ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

$$\tilde{k} = k + ik \quad (2.173)$$

จากสมการที่ (2.171) กลายเป็น

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{-kz} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.174)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกลดทอนลง เนื่องจากความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนกับ E^2 (และความเข้มจะสัมพันธ์กับ e^{-2kz}) และนิยามได้ว่า

$$\alpha = 2k \quad (2.175)$$

สมการที่ (2.175) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ω/k และค่าดัชนีหักเหของตัวกลางคือ

$$n = \frac{ck}{\omega} \quad (2.176)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นแก๊สแล้ว พจน์ที่สองของสมการที่ (2.170) จะมีค่าน้อย และสามารถประมาณค่ารากที่สองในสมการที่ (2.173) โดยใช้พจน์แรกของการกระจายแบบไบนอมิเยล

$$\sqrt{1+\varepsilon} \cong 1 + \frac{1}{2}\varepsilon \quad \text{จะได้ว่า}$$

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\varepsilon}_r} \cong \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega_j} \right] \quad (2.177)$$

$$n = \frac{ck}{\omega} \cong \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j (\omega_{0j}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_j^2 \omega^2}$$

ถ้าพิจารณาในช่วงความถี่ที่ต่างจากความถี่กำทอน แล้วการห้วงสามารถตัดทิ้งได้และสูตรในการหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \quad (2.178)$$

วัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีความถี่ธรรมชาติ ω_j แต่สำหรับวัสดุที่โปร่งแสงแล้วค่าความถี่กำทอนจะอยู่ในย่านความถี่ของคลื่นอัลตราไวโอเล็ตดังนั้น $\omega < \omega_j$ แล้วจะได้

$$\frac{1}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} = \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2} \right)^{-1} \cong \frac{1}{\omega_{0j}^2} \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_{0j}^2} \right)$$

และจากสมการที่ (2.141) เปลี่ยนรูปเป็น

$$n = 1 + \left(\frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2} \right) + \omega^2 \left(\frac{Nq^2}{2m\varepsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^4} \right) \quad (2.179)$$

หรือในพจน์ของค่าความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ หรือในอากาศ

$$\lambda = 2\pi c/\omega$$

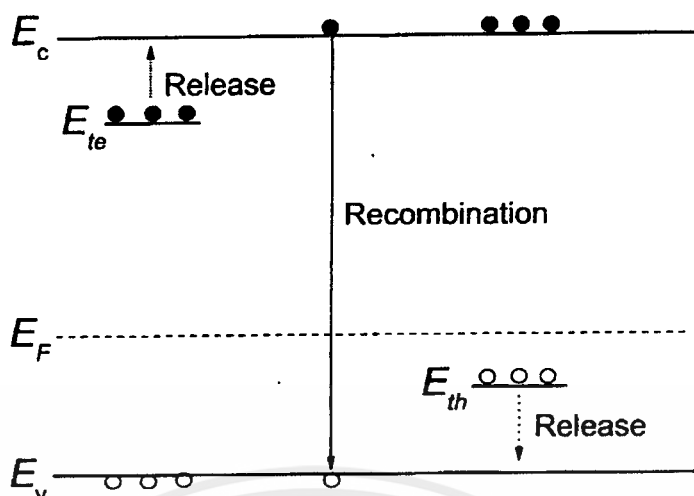
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 1 + A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2} \right) \quad (2.180)$$

จากสมการที่ (2.180) เป็นที่รู้จักในนามของ สมการคอซี (Cauchy's formula) ค่าคงที่ A คือค่าสัมประสิทธิ์ของการหักเห และ B คือค่าสัมประสิทธิ์ของดิสเพอร์ชัน สมการคอซีใช้ได้กับตัวกลางที่เป็นแก๊สที่อยู่ในย่านความถี่ของคลื่นแสงที่ตามองเห็น (optical region)

2.15 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ออร์ัน (งามนิทย์, 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) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ที่มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ตีกระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อยแต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาชามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ออร์ัน (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.31 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดง ถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.181)$$

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.182)$$

แทนสมการที่ (2.121) ลงในสมการที่ (2.181) จะได้

$$I = en\mu n_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.183)$$

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

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.184)$$

แทนสมการที่ (2.183) ลงในสมการที่ (2.184) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.185)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.186)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.187)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.190) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) (nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_i V_a \quad (2.188)$$

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.189)$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.190)$$

โดยที่

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

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

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT} \right) \quad (2.191)$$

$$\ln \tau_r = \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right) = \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1,000k)} \left(\frac{1,000}{T} \right)$$

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

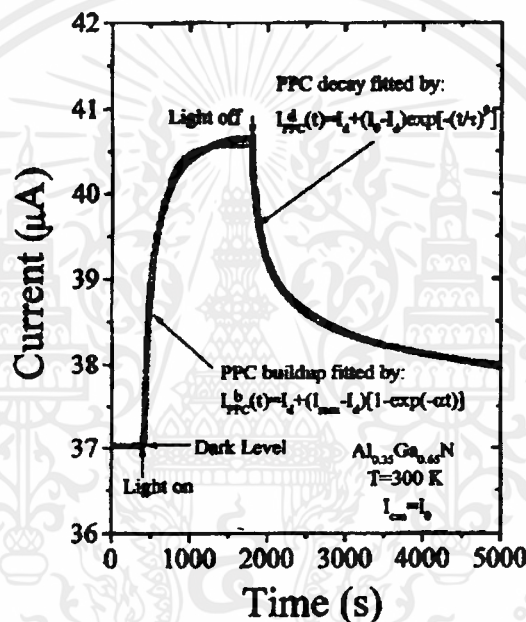
ดังนั้น $E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} = (0.086)(\text{ความชัน})$ อิเล็กตรอนโวลต์ (2.192)

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต้องร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.193)$$

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตชาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตชาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.194)$$

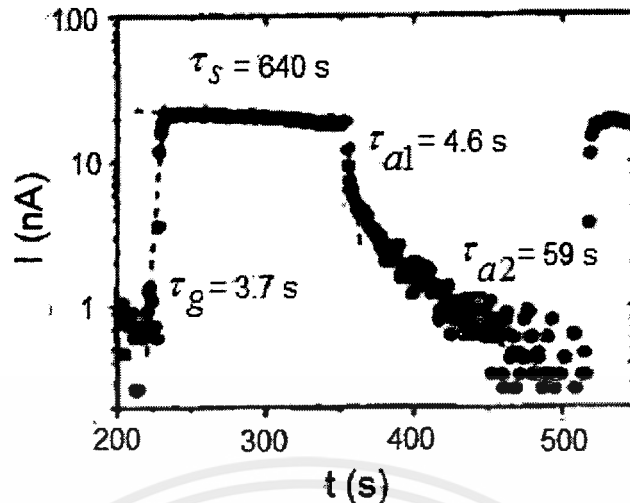


รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลง ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีน

จากสมการที่ (2.192) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.195)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตชาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตชาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.33) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรั้นทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.188) และสมการที่ (2.192) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.196)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.195) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.197)$$

จากสมการที่ (2.196) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{n2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.197) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.198)$$

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.199)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.200)$$

และ

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.201)$$

สมการที่ (2.196) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.202)$$

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) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.203)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโตะขาขึ้นของกลางสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.184) และ (2.196) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.204)$$

จากสมการที่ (2.203) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.205)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.206)$$

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

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.207)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.208)$$

สมการที่ (2.203) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

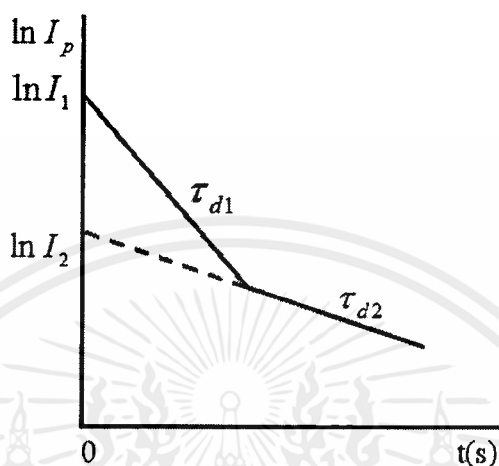
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.209)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการฟิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโพโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1'' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2'' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.210)$$

2.15.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสโฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสโฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสโฟโตชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.211)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{\ln I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.212)$$

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

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.213)$$

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

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.214)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

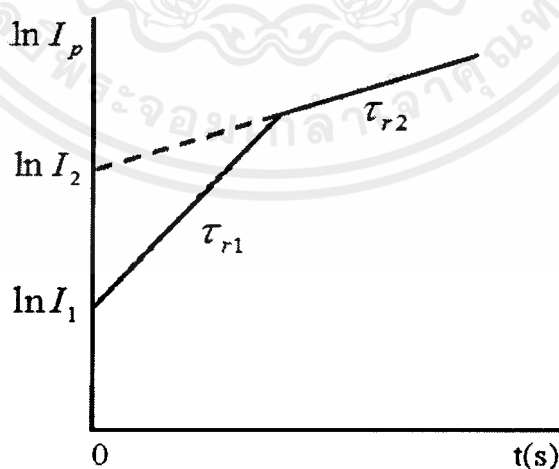
$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.215)$$

และ

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.216)$$

2.15.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.217)$$

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

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

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -\frac{t}{\tau_r} \quad (2.218)$$

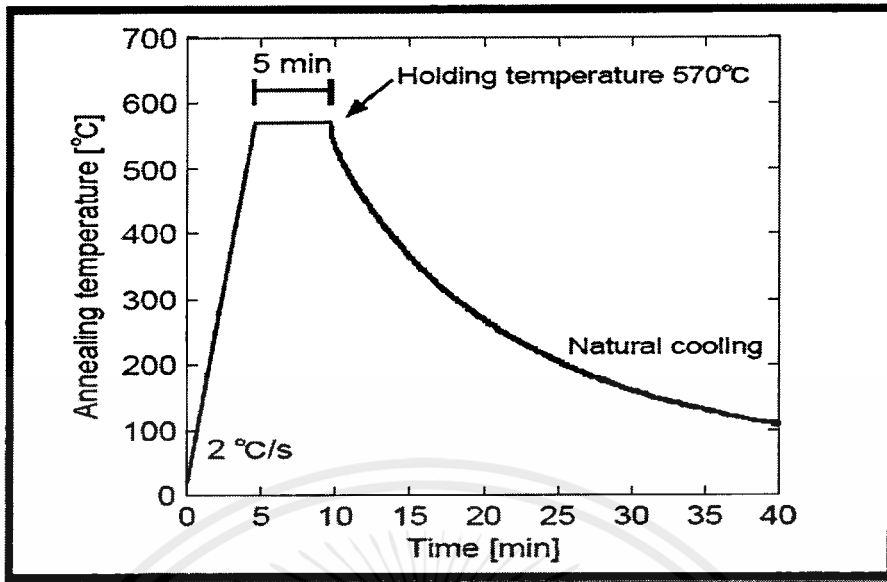
จากสูตร $\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$

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

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.218) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.212), (2.214), (2.215) และ (2.216) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

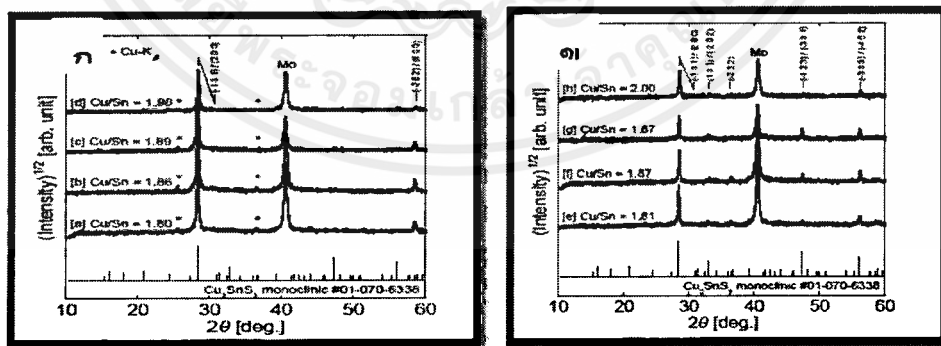
ฟิล์มบาง CTS ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาเคลือบบนแผ่นฐานรองรับซึ่งเป็นกระจก *soda-lime* แบบ *Mo-coated* หนา $1\mu\text{m}$ โดยการระเหยร่วมในระบบสุญญากาศ ธาตุต่างๆที่ใช้ คือ *Cu*(6N purity), *Sn*(6N purity), *S*(6N purity) เพื่อให้ได้ฟิล์มกัมมันต์ที่ใช้งาน ไอกัมมันต์ระเหยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสจะแตกตัวด้วยความร้อนเป็นโมเลกุลเล็กๆจากโมเลกุลของ S_8 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสโดยใช้วาล์ว *cracking cell* ในระหว่างการระเหย อุณหภูมิของพื้นผิวรองรับรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสและความดันต่ำกว่า 10^{-4} Pa



รูปที่ 2.36 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิเตาที่ใช้แอนนีส

ฟิล์มที่เคลือบสาร Cu และ Sn อบที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาทีใช้ก้อนกำมะถัน 100 มิลลิกรัม (6N purity) ใส่ในเตาเผาซึ่งเต็มไปด้วย N_2 ที่ความดันดันบรรยากาศหลังจากทำความร้อนขึ้นตัวอย่างจะถูกเก็บในเตาและปล่อยให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิต้อง

สำหรับฟิล์มที่เคลือบสาร CTS และฟิล์ม CTS ที่แอนนีส ตามลำดับใช้ XRD Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารสัมพันธ์ CTS Cu/S=2 และ S/(Cu+Sn)=1 จะเห็นว่าสำหรับฟิล์มที่เคลือบสาร อัตราส่วน Cu/S เปลี่ยนแปลงจาก 1.8 เป็น 1.98 แสดงว่าการอบนั้นมีผลต่ออัตราส่วนนี้เพียงเล็กน้อยเป็นผลมาจาก sulfurization of Mo

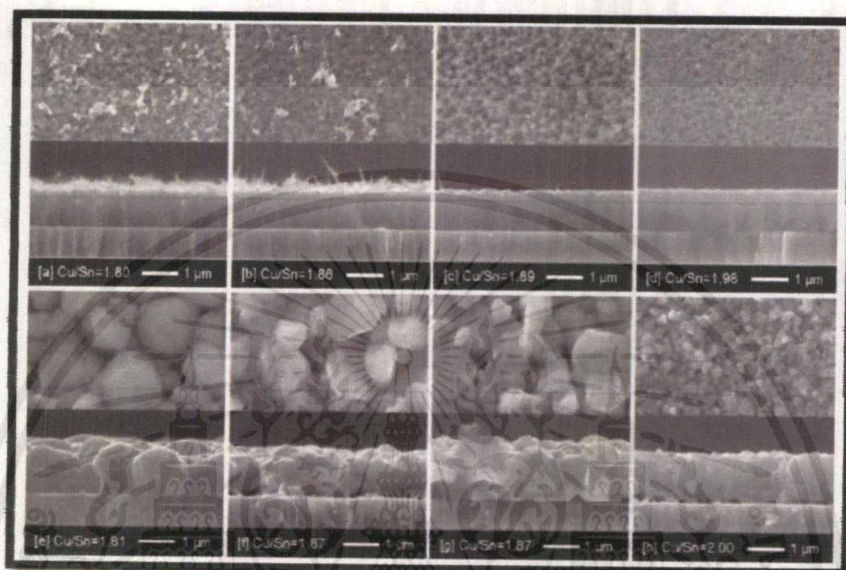


รูปที่ 2.37 การใช้ XRD วิเคราะห์สาร (ก) ฟิล์มที่ฝากเข้า และ (ข) ฟิล์มที่ผ่านการหล่อลื่นที่มีอัตราส่วน Cu/Sn ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ฟิล์มที่เคลือบสาร CTS และฟิล์ม CTS ที่อบตามลำดับ จุดสูงสุดที่ 40.5 องศา เป็นผลมาจาก Mo มีโครงสร้างแบบ monoclinic ซึ่งขึ้นกับผงผลึกและฟิล์มบางที่เคลือบสารแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสูงสุดที่ 28 องศาและ 58 องศา ดังนั้นฟิล์มเหล่านี้มีระนาบ (131)/(200) หลังจากการอบมีการจับคู่ชัดเจนที่จุดสูงสุด 28, 33, 37, 47 และ 56 องศาแสดงให้เห็นว่าการประดิษฐ์ฟิล์ม CTS มีโครงสร้างผลึกแบบ *monoclinic* เมื่ออัตราส่วน Cu/Sn เพิ่มขึ้นความเข้มสัมพัทธ์ของจุดสูงสุดที่ 28 องศาลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการเสื่อมสภาพของคุณภาพในผลึก ดังนั้นคุณภาพผลึกที่สูงขึ้นสามารถทำฟิล์มที่มีองค์ประกอบของ Sn



รูปที่ 2.38 แสดงภาพผิวหน้าและตัดขวางจาก SEM ที่แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่เรียงตัวกันอยู่ (แถวบน) และแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอบ(แถวล่าง)

ฟิล์มที่ขอบขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วน Cu/Sn ลดลงคิดว่าเป็นผลการเติบโตของเกรนที่เพิ่มขึ้นในไอ SnS ที่เกิดจากการระเหยของฟิล์ม Sn-rich มีรายงานผลกระทบคล้ายกับ ฟิล์ม CZTS ในทางกลับกัน ตัวอย่างเช่น [e] พบว่ามีชั้น MoSx ที่อินเตอร์เฟซ Mo/CTS ในงานก่อนหน้า นี้ ชั้น MoSx และอัตราส่วน S/(Cu+Sn) ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้หลังกระบวนการ RTP เช่นเดียวกันกับ S เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังไฟฟ้า (PCE) ดีที่สุด 4.29% ประกอบด้วยอัตราส่วน Cu/Sn = 1.87 ฟิล์มบาง CTS ที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่ามีค่าประมาณ 1.9

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (งา ม นิตย; 2545, รุ ตินัย; 2546, รุ ตินัย; 2549, รุ ตินัย; 2550, รุ ตินัย; 2551, งา ม นิตย; 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

- 1) แผ่นกระจกสไลด์
- 2) ที่ตัดกระจก
- 3) เครื่องอัลตราโซนิก
- 4) เครื่องเป่าลมร้อน
- 5) เตาอบ
- 6) บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
- 7) สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
- 8) นาฬิกาจับเวลา
- 9) ปากคืบ
- 10) เตาอบ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส

- 1) ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
- 3) สารตั้งต้น CuS ปริมาณ 0.4917 กรัม และ SnSe ปริมาณ 0.5083 กรัม
- 4) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ Sartorius
- 5) เตาอบสาร
- 6) ปากคืบ
- 7) แวนตากรองแสง

- 8) ภาวะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีสามารถควบคุมความชื้นได้
- 9) ครกบดสาร

3.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

- 1) นามาแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
- 2) ทาทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
- 3) ทาทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
- 4) ทาทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
- 5) ขึ้นตอนในข้อ 2-5 นาฬิกาเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
- 6) เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
- 7) นามาแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
- 8) เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

3.2.2 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ที่มีองค์ประกอบต่างๆ

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ โดยเตรียมจากผงผลึกของสารประกอบ CuS และ SnSe



มวลอะตอมของธาตุ Cu , Sn , S และ Se มีค่าเท่ากับ 63.546, 118.71, 32.066 และ 78.96 กรัมต่อโมลตามลำดับ

มวลโมเลกุลของสารประกอบ $\text{CuS} = 63.546 + 32.066 = 95.612$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ $\text{SnSe} = 118.71 + 78.96 = 197.67$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุล $\text{Cu}_2\text{SnS}_2\text{Se} = (2 \times 63.546) + 118.71 + (2 \times 32.066) + 78.96$
 $= 388.894$ กรัมต่อโมล

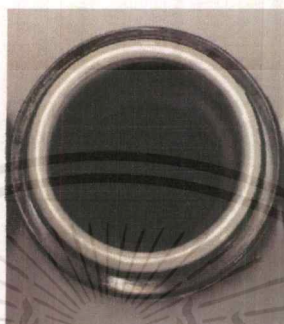
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการสารตั้งต้น $\text{Cu}_2\text{SnS}_2\text{Se}$ จำนวน 1 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นเป็นผลึกของ

$$\text{สารประกอบ CuS} = \left(\frac{2 \times 95.612}{388.894} \right) = 0.4917 \text{ กรัม}$$

$$\text{สารประกอบ SnSe} = \left(\frac{197.67}{388.894} \right) = 0.5083 \text{ กรัม}$$

นำสารมาบดรวมกันในครกอากาศเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงเพื่อให้สารมีความละเอียด



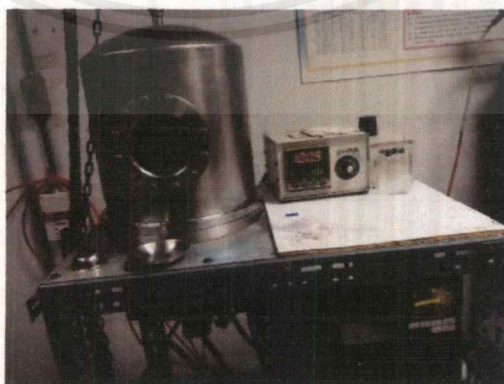
รูปที่ 3.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้น $\text{Cu}_2\text{SnS}_2\text{Se}$ ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลอง

3.2.3 ขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn(S,Se)}_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

- 1) ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยขจัดสิ่งปนเปื้อน ไออะซิโตนเช็ดคราบไขมันและผงฝุ่น
- 2) ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศให้ครบถ้วน
- 3) ทำการเคลือบฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn(S,Se)}_2$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส เริ่มจากการนำสารตั้งต้น $\text{Cu}_2\text{SnS}_2\text{Se}$ ปริมาณ 0.3 กรัมนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นบรรจุใส่ลงไปในเข้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำมาจากโลหะโมลิบดีนัมเคลือบด้วยอลูมินา
- 4) นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ได้เตรียมไว้มาวางลงบนหน้ากาก(mask)ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

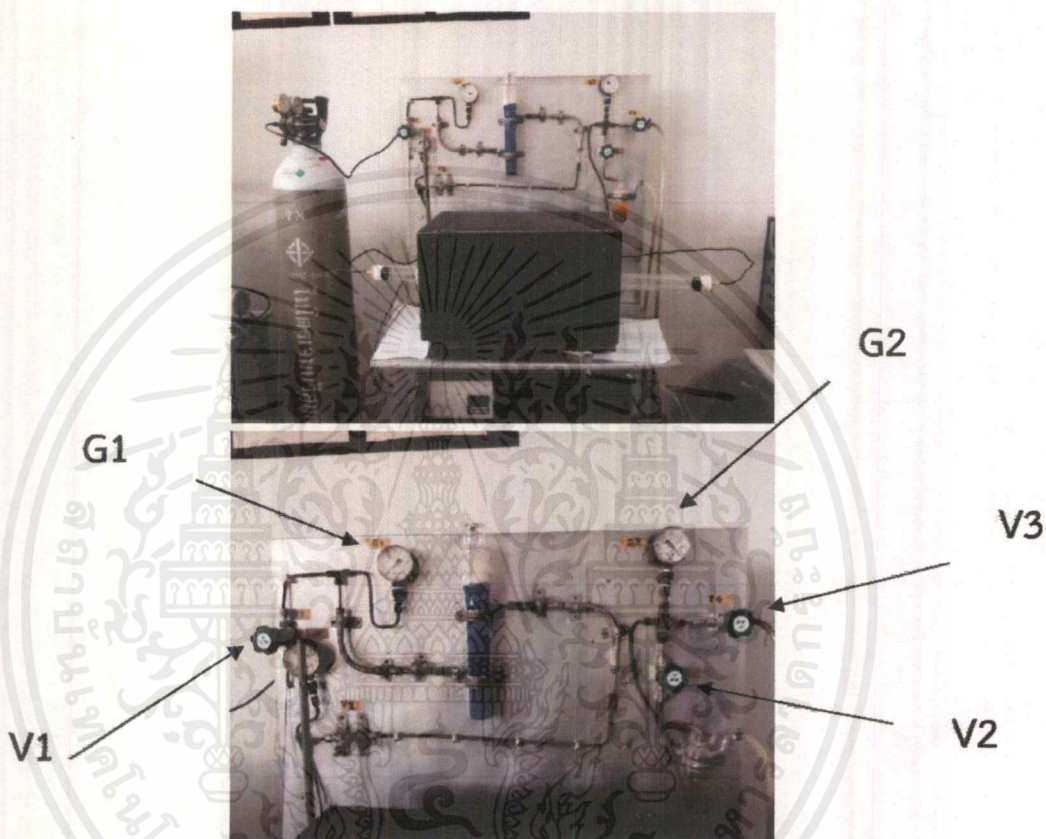
- 5) ตรวจสอบระบบประเหยสารเคมีว่าวาล์วสูบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
- 6) ทำการเปิดปั้มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 9×10^{-2} มิลลิบาร์แล้วจึงเปิดปั้มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการ การทดลองนี้ใช้ความดันช่วง 3×10^{-5} ถึง 4×10^{-5} มิลลิบาร์
- 7) ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับโดยการเปิดสวิตซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์แล้วแช่ไว้ประมาณ 5 นาทีเพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100-130 แอมแปร์จนได้ความหนาของฟิล์มบางประมาณ 500-800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มประมาณ 30 นาที
- 8) เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว จึงปิดแผ่นกั้นการระเหยแล้วทำการปิดวาริแอกโดยค่อยๆลดกระแสช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
- 9) ต่อจากนั้นให้ระบบทำงานต่ออีก 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั้มเทอร์โบ ให้ระบบทำงานต่ออีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วเปิดวาล์วสูบอากาศและปั้มกลโรตารี
- 10) รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
- 11) นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ เรียบร้อยแล้วออกจากห้องสุญญากาศแล้วเช็ดทำความสะอาดระบบประเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วนำไปทำการอบที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, และ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.2 แสดงระบบประเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ขั้นตอนในการอบ (Annealed) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_2$ ซึ่งเคลื่อนสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 แสดงระบบของเตาอบ (Annealed) ฟิล์ม

- 1) นำฟิล์มที่ได้ใส่ในท่อแก้วแล้วปิดท่อแก้ว ตรวจสอบวาล์วหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
- 2) เปิดวาล์วที่ถังแก๊สไนโตรเจนให้ความดันไม่เกิน 50 กิโลปาสกาล เสียบปลั๊กโรตารีปั๊มเพื่อนำอากาศออก แล้วตรวจสอบรูระบายอากาศออกสู่ภายนอกห้องให้นำอากาศออกได้สะดวก
- 3) เปิดวาล์วหมายเลข 3 ซ้ำๆ เพื่อดูดอากาศออกจากท่อแก้วให้หมดจากเกจ G2 แล้วปิดวาล์วหมายเลข 3
- 4) เปิดวาล์วหมายเลข 1 ซ้ำๆ ให้อุณหภูมิ G1 ไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (เพื่อไม่ให้หลอดซิลิกาเจลระเบิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ปรับวาล์วหมายเลข 1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าๆดูจากสเกลของเกจ G2 ให้เต็มสเกลแล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 1
- 6) ทำการดูดอากาศออกจากท่อแก้วโดยการเปิดวาล์วหมายเลข 4 รอให้สเกลของเกจ G2 ลดลงต่ำสุดประมาณ -30 มิลลิเมตรปรอทแล้วทำการปิดวาล์วหมายเลข 4
- 7) เริ่มทำซ้ำตามข้อ 4, 5, และ 6 อีก 2 ครั้งเพื่อให้ไม่มีอากาศหลงเหลืออยู่ในท่อแก้วเป็นการทำความสะอาดอากาศออกจากท่อแก้ว
- 8) ปิดวาล์วหมายเลข 4 เปิดวาล์วหมายเลข 1 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าท่อแก้วช้าๆ จนสเกลของเกจ G2 เพิ่มขึ้นเต็มสเกลแล้วจึงเปิดวาล์วหมายเลข 2 ให้สูงสุดจะเห็นฟองอากาศผุดขึ้นถ้าเห็นฟองอากาศผุดขึ้นเร็วให้ลดการไหลของแก๊สไนโตรเจนโดยการปรับวาล์วหมายเลข 1 ต้องให้สเกลของเกจ G1 ต้องมีความดันไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
- 9) ห้ามให้สเกลของเกจ G1 มีความดันสูงเกินไปหรือต่ำเกินไปให้ปิดโรตารีปั๊ม ทำการเปิดแหล่งจ่ายกระแสแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เตาอบตามต้องการ ใช้เซรามิกไฟเบอร์อุดที่หัวเตาและท้ายเตาเพื่อรักษาอุณหภูมิในเตาอบให้คงที่
- 10) รออุณหภูมิให้มีค่าตามที่ได้ตั้งค่าไว้แล้วทำการรอบต่อไปเป็นเวลา 60 นาทีเมื่อครบกำหนดเวลาให้ปิดแหล่งจ่ายกระแส แล้วเอาเซรามิกไฟเบอร์ออก(ต้องสวมถุงมือและหน้ากากอนามัย เซรามิกไฟเบอร์อันตรายมาก)
- 11) ตั้งอุณหภูมิให้เป็นอุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสจึงจะปิดวาล์วทุกตัว
- 12) รอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงจะเอาฟิล์มออกจากเตาอบ
- 13) นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cu_2Sn(S,Se)_2$ มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าสมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางใส่ถุงซิปล็อคไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

3.3 ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

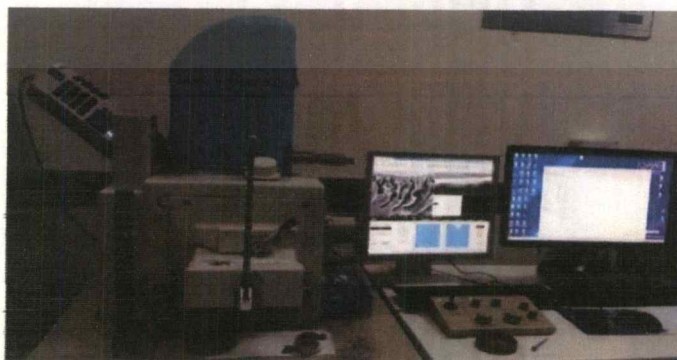
เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.3.2 การศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรุ่น FESEM-EDS (7610F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

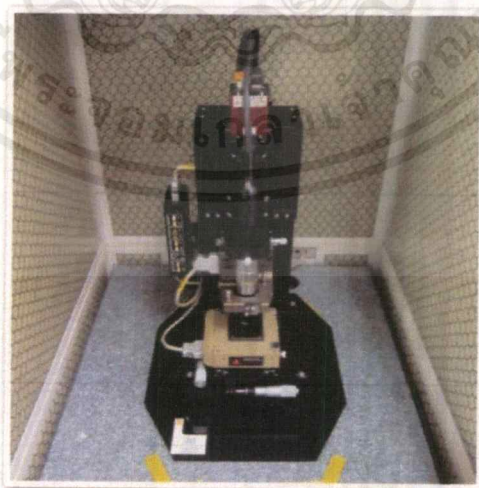
นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสลิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2600 โดยใช้ความยาวคลื่น 220 ถึง 1400 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 3.6 ยูวี-วิสลิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2600

3.3.4 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมรุ่น Park system XE 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

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

3.3.5.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

- 1) ต่อดวงจรรวมและใช้โปรแกรมร่วมกับ โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้
- 2) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ
- 3) คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

$$R_{sh} = R \left(\frac{w}{l} \right)$$

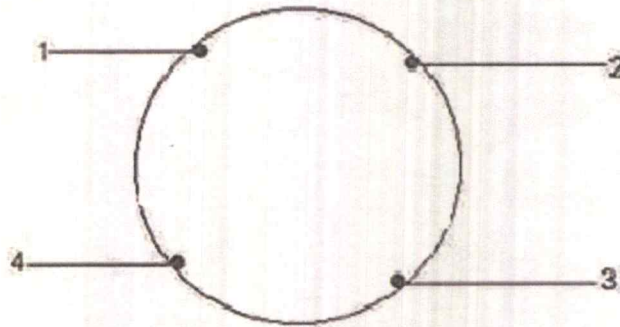
เมื่อ R คือ ค่าความชันกราฟ

w คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

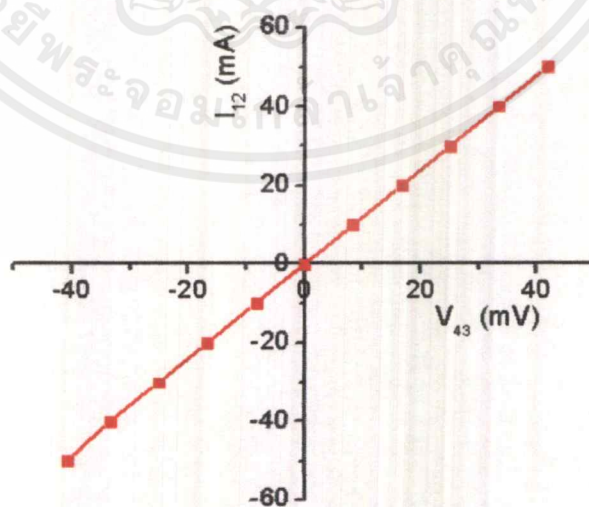
3.3.5.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

จากหลักการแวนเดอร์เพาว์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



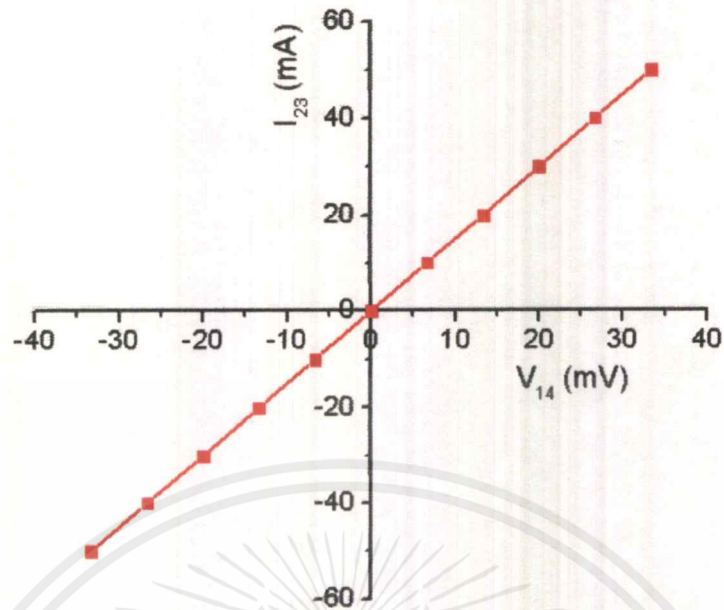
รูปที่ 3.8 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ตรวจสอบ ขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยโดยการวัดค่าความต้านทานด้วย โอมมิเตอร์จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

- 1) จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดย ทำการวัดความต่างศักย์ V_{43} ให้ได้ เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแส ตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
- 2) ทำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นจ่ายกระแสทางขั้ว 2 และออกทางขั้ว 3 โดย ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{14} แทน
- 3) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{12}) กับ (V_{43}) และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{23}) กับ (V_{14}) แล้วคำนวณหาค่าความชันของทั้ง 2 กราฟจะได้ R_1 และ R_2



รูปที่ 3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

4) คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

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

เมื่อ

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

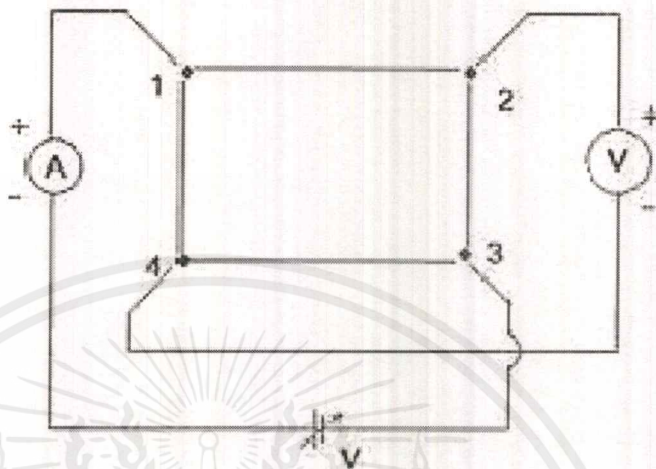
5) คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากสูตร

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

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

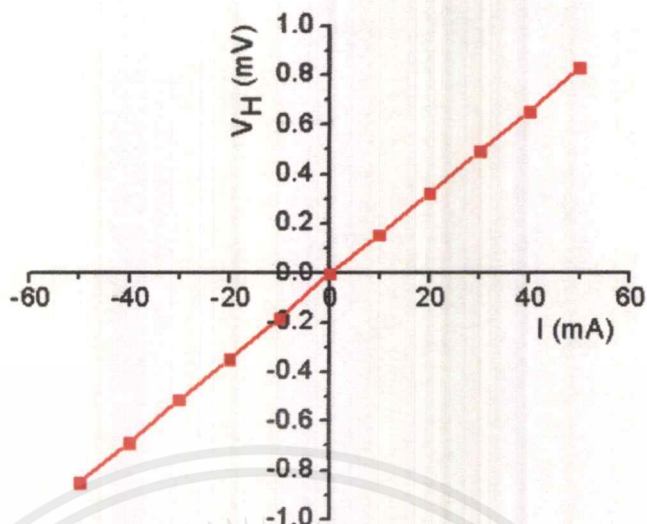
3.3.5.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดตั้งรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

- 1) ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B=0$) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{24} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามนาฬิกาแล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
- 2) นำตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก ($B \neq 0$) ความต่างศักย์ V_{24} ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้เรียกว่า 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



รูปที่ 3.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (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 $\left(\frac{V_H}{I} \right)$ 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} คูลอมป์

- 6) คำนวณหาค่าสภาพคล่องของฮอลล์ (μ_H) จากสูตร

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

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

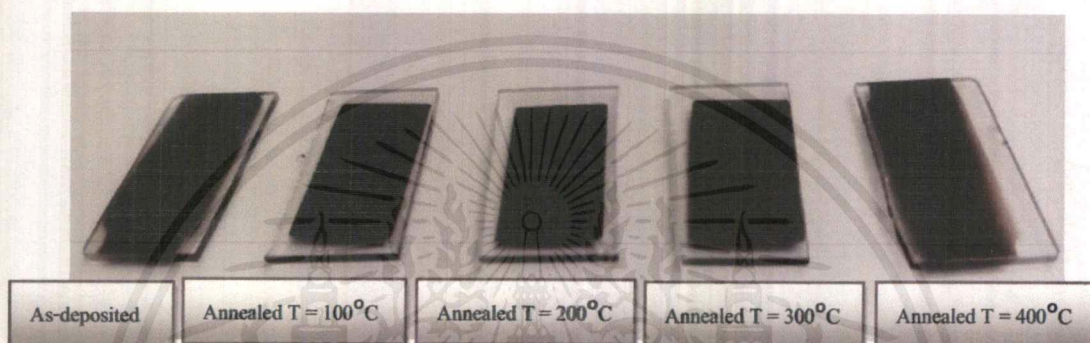
ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ทำการเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการแอนนัลใน N_2 ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัด การส่งผ่านแสงการดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

4.1 ลักษณะฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ $\text{CuS} : \text{SnSe}$ ในอัตราส่วน 2:1 จะได้ฟิล์มมีสีน้ำตาลโปร่งแสงผิวหน้าของฟิล์มจะเรียบสม่ำเสมอและมันวาวยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดีสามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศมีการนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที ภาพถ่ายของสารตั้งต้นและภาพถ่ายของฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ จะแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูป 4.2 ตามลำดับ



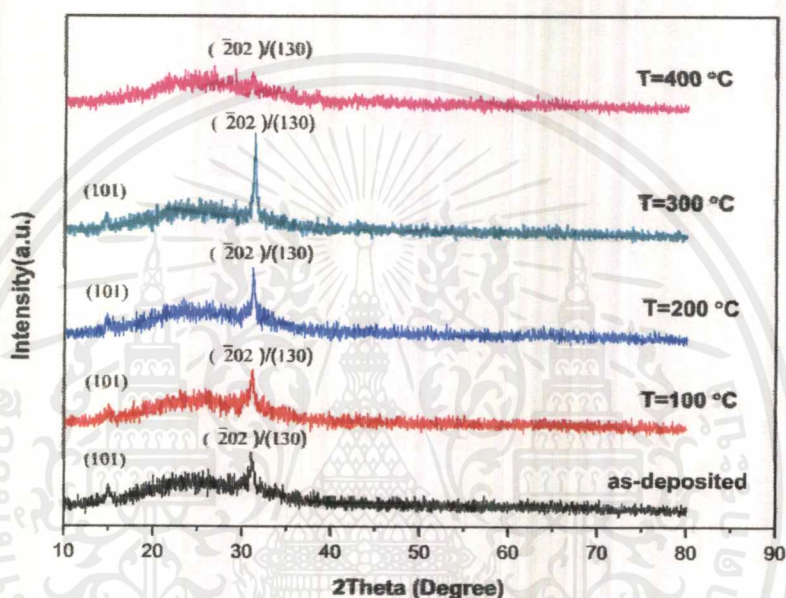
รูปที่ 4.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้น $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$



รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไป แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

จากรูปที่ 4.3 จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาทีพบว่าฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพีคที่มีความเข้มสูงสุดของมุม 2θ เท่ากับระนาบ ของโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก

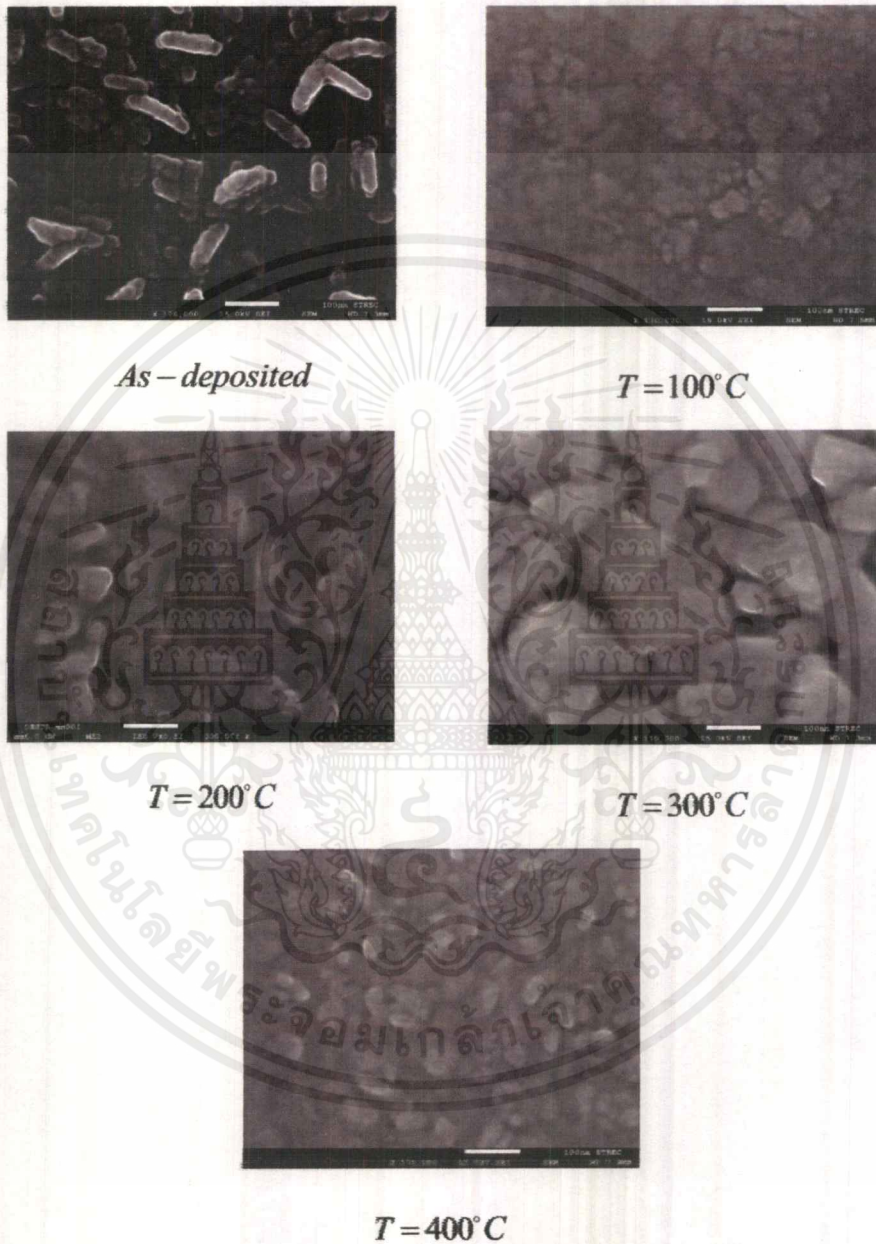
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนิลและนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนิล 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแรงอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



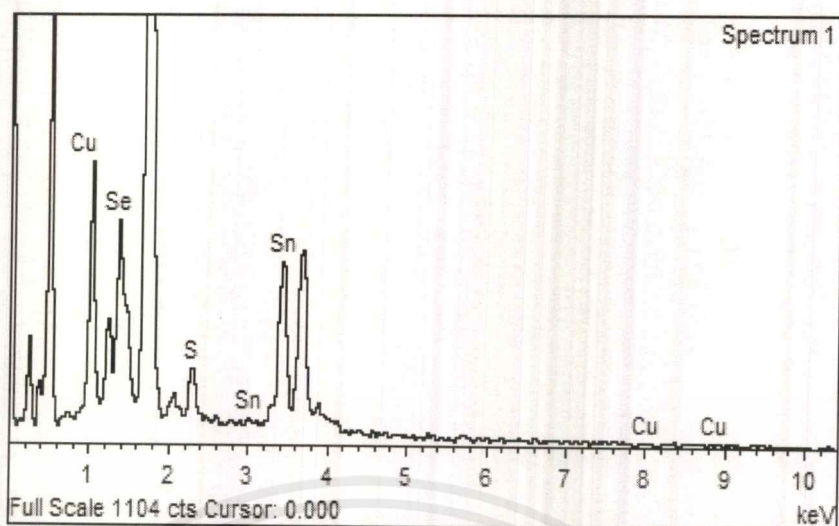
รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย FESEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของ เกรนและ ความขรุขระของพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Annealing Temperature (C)	Grain Size (nm)	Roughness (nm)
As-deposited	146	10.45
100	120	8.77
200	69	5.37
300	58	6.28
400	136	13.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

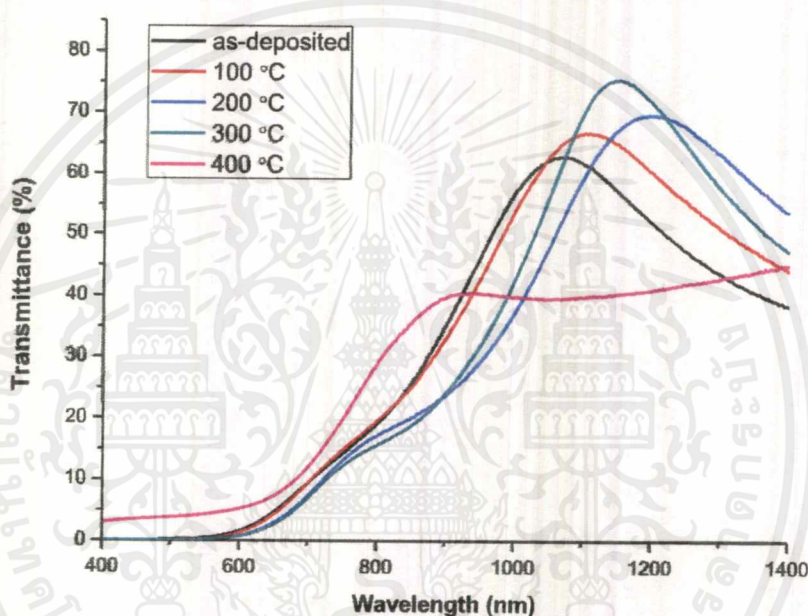
4.2.4 ผลการศึกษาผลการศึกษาฟูเรียร์แตรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

Annealing Temperature (°C)	Peak of FTIR (cm ⁻¹)	Assignment Vibration Mode	Reference
As-deposited	3420	O-H stretching	Ahmad, 2018
	2863	C-H bonding	Ahmad, 2018
	1624	C=O bonding	Ahmad, 2018
	764	C=S stretching	Sandra, 2015
100	2876	C-H bonding	Ahmad, 2018
	2097	C≡S	Zaid, 2019
	1634	C=O bonding	Ahmad, 2018
	764	C=S stretching	Sandra, 2015
200	3166	O-H stretching	Ahmad, 2018
	2095	C≡S	Zaid, 2019
	1767	C-H bonding	Ahmad, 2018
	763	C=S stretching	Sandra, 2015
300	3410	O-H stretching	Ahmad, 2018
	2353	C≡S	Zaid, 2019
	1767	C-H bonding	Ahmad, 2018
	1635	C=O bonding	Ahmad, 2018
	765	C=S stretching	Sandra, 2015
400	3393	O-H stretching	Ahmad, 2018
	2495	C≡S	Zaid, 2019
	1558	C=O bonding	Ahmad, 2018
	763	C=S stretching	Sandra, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

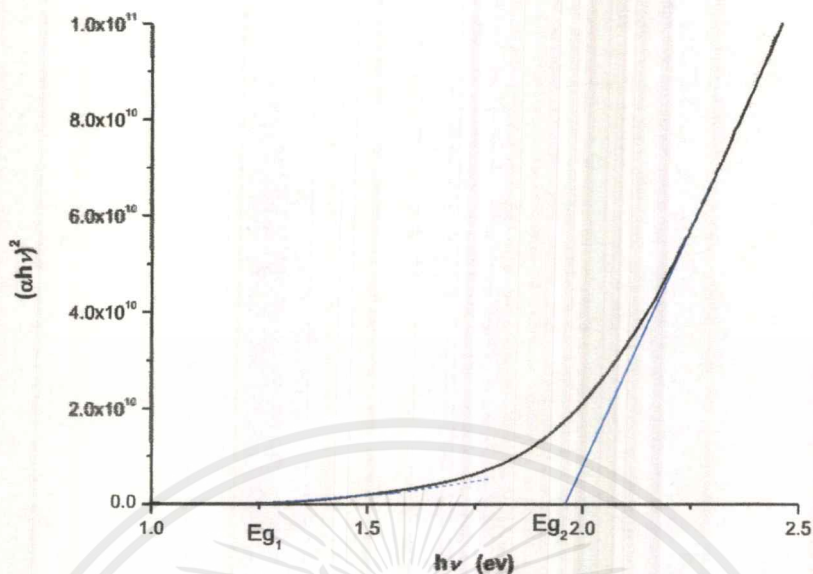
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส

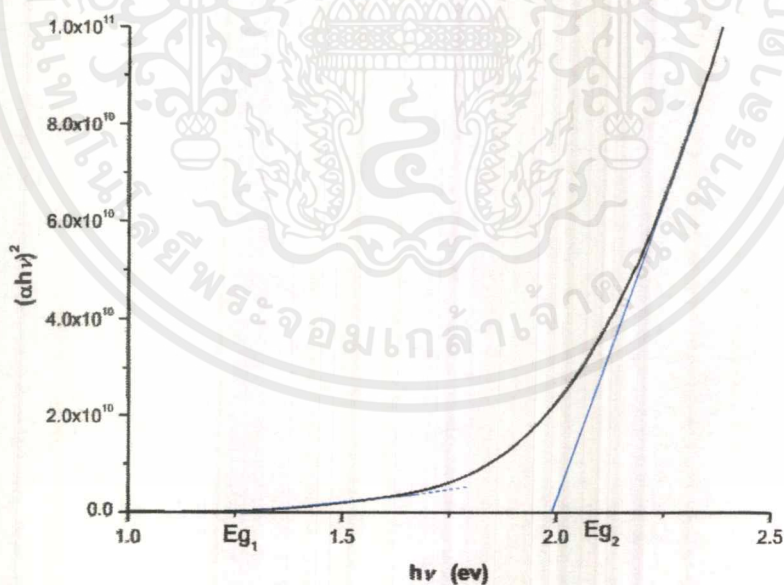


รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

จากกราฟความสัมพันธ์ของ $(\alpha h\nu)^2$ กับ $(h\nu)$ พบว่าฟิล์มบางทั้งที่ไม่แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียสมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2 ค่า แสดงว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มี 2 เฟสผสมกันอยู่โดยที่เฟส $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำประมาณ 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนเฟส $\text{Sn}(\text{S,Se})_2$ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงประมาณ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์

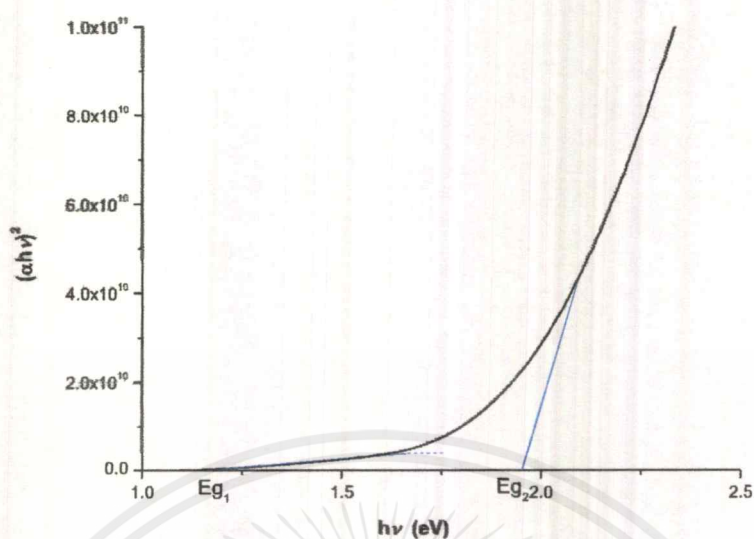


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนผ้าฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่ผ่านการแอนนیل

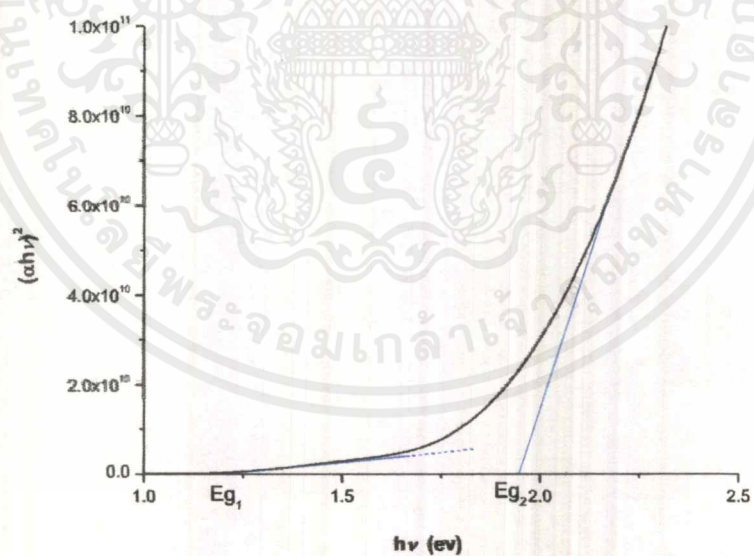


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนผ้าฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนิล 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

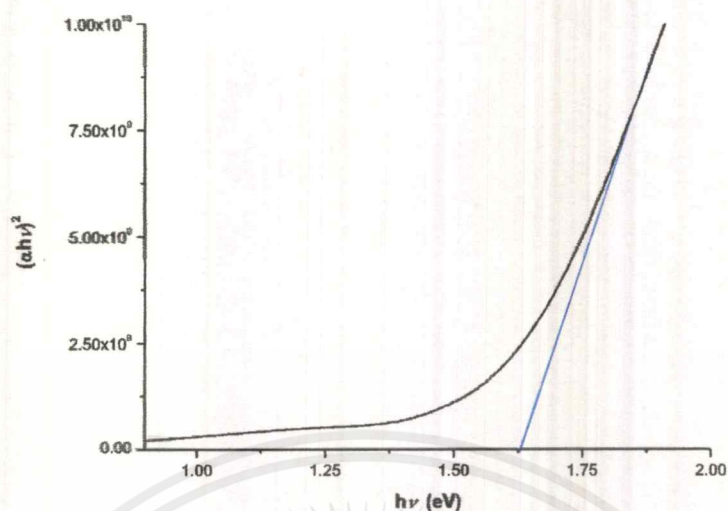


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนผ้ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนผ้ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

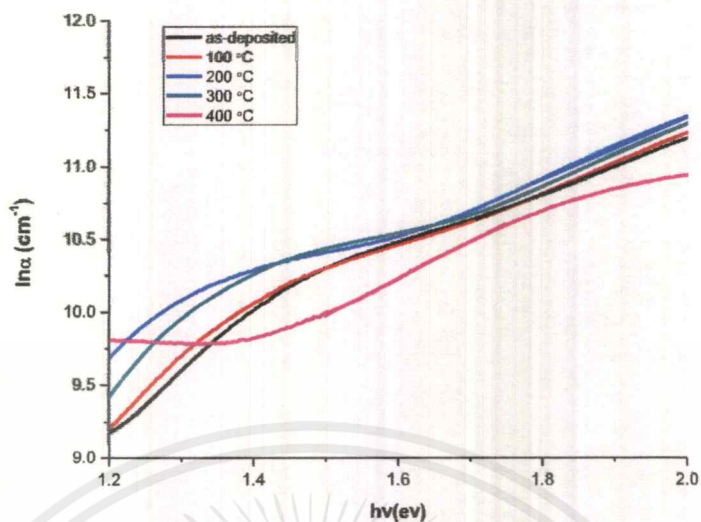


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสใช้ เวลาในการแอนนีส 60 นาที

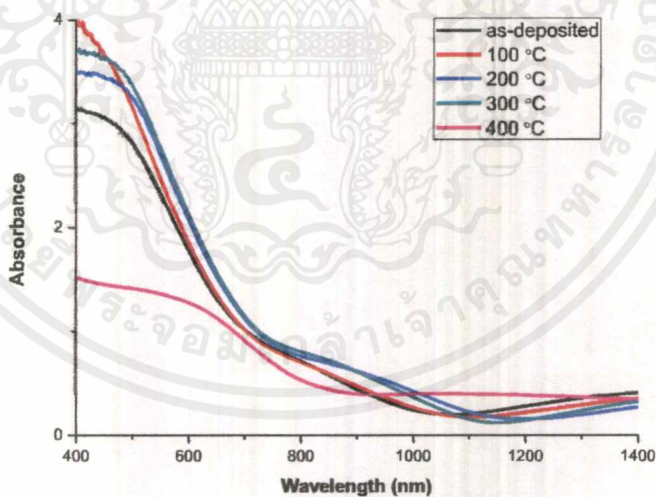
ตารางที่ 4.3 ค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศผ่านการแอนนีสและไม่แอนนีส

Annealing Temperature (°C)	Energy Gap(eV)	
	E_{g1}	E_{g2}
As-deposited	1.25	1.96
100	1.25	1.99
200	1.17	1.95
300	1.20	1.95
400	1.62	-

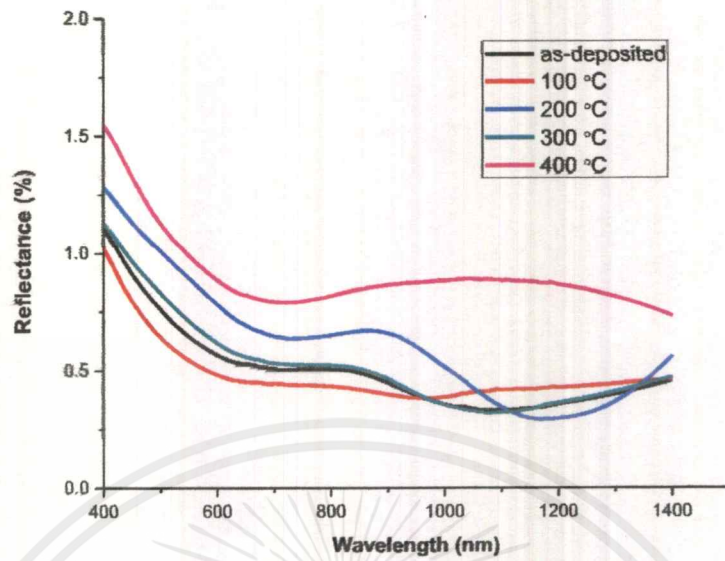
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง ($\ln \alpha$) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

4.3.2 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส

ค่าดัชนีหักเห (n) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$n = n_s \left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^{1/2}$$

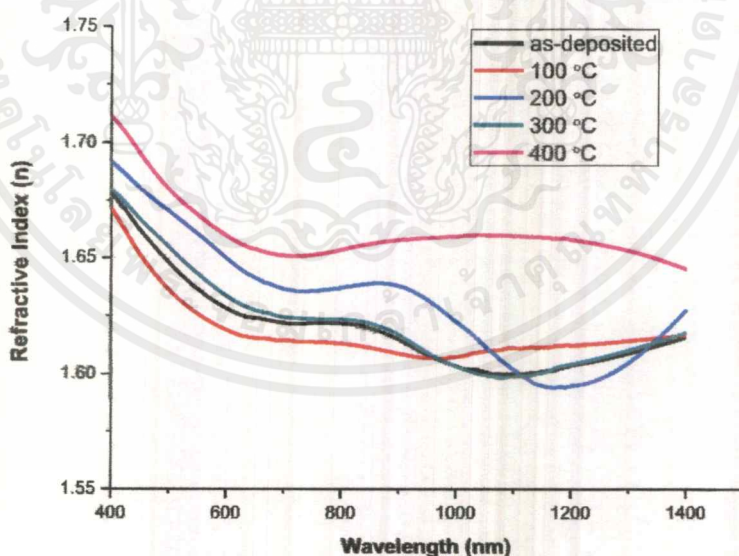
เมื่อ n_s คือ ค่าดัชนีหักเหของกระจกสไลด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.51 และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}$$

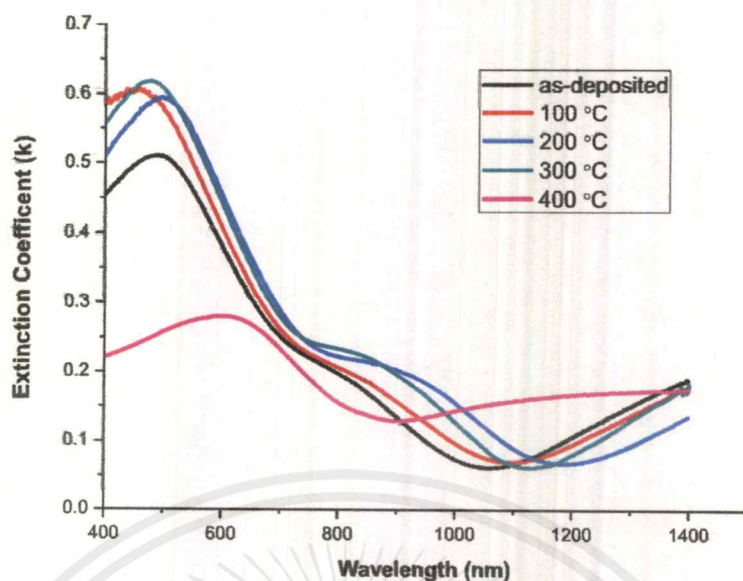
จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับกับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกคือ

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*}$$

$$n^* = n - ik$$



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

4.3.3 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไม่แอนนีส

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ^*) แสดงได้ดังสมการ

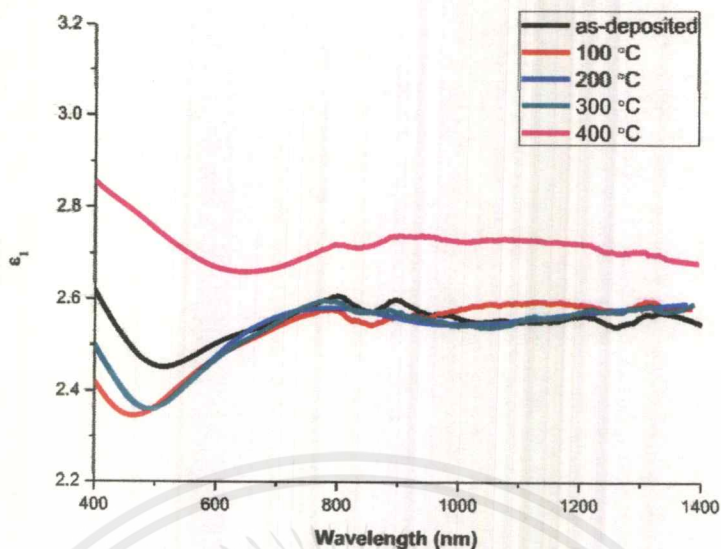
$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

โดยที่

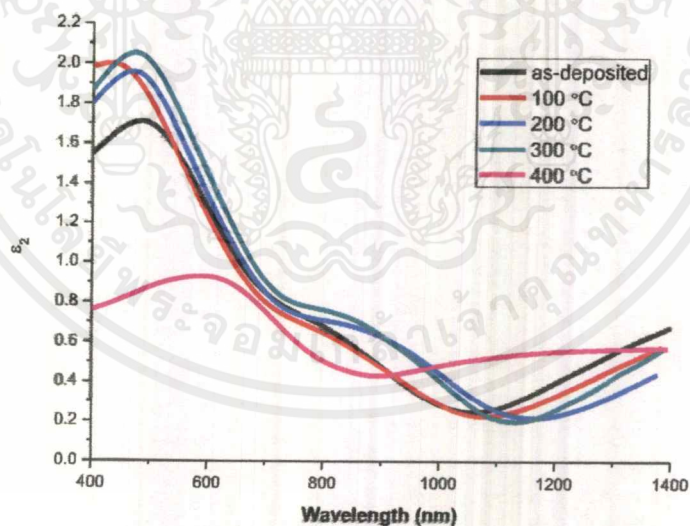
$$\epsilon_1 = n^2 - k^2$$

$$\epsilon_2 = 2nk$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็กระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็กระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

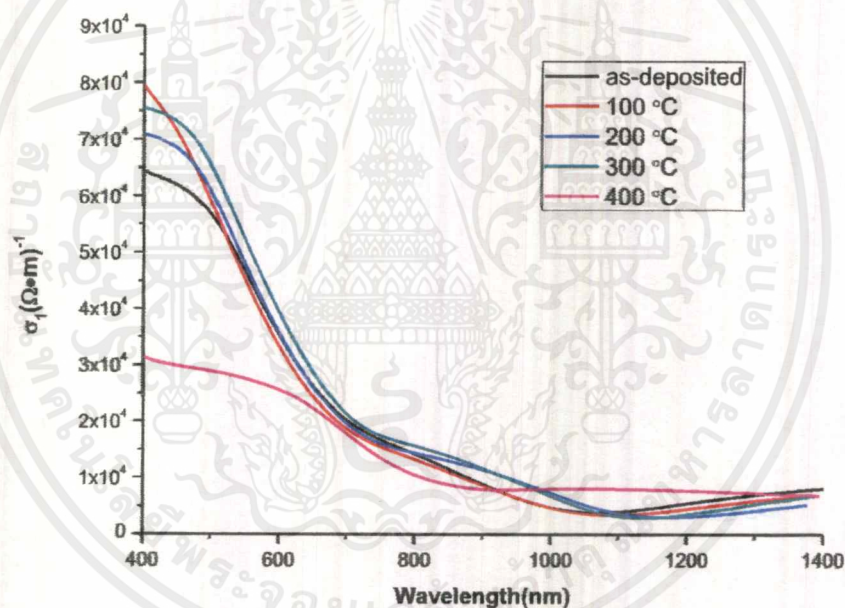
4.3.4 การหาค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส

จำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำเชิงแสง (σ^*) จะนิยามดังนี้ คือ

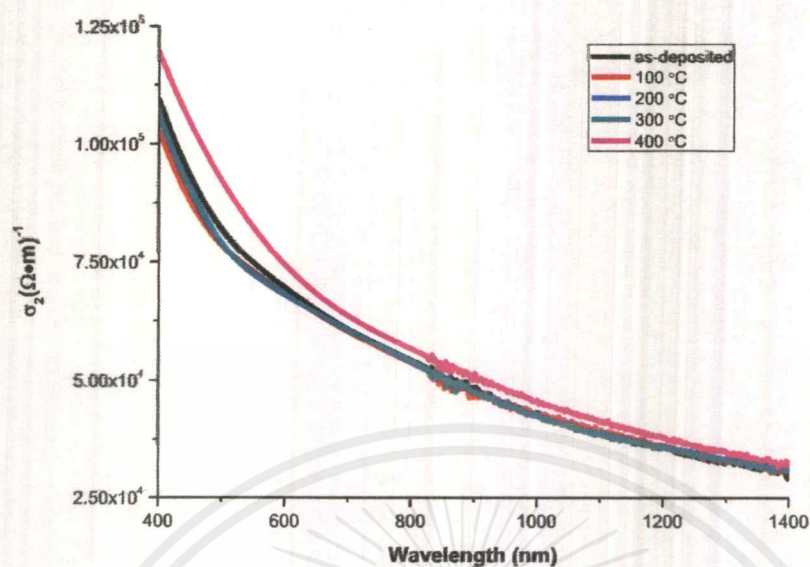
$$\sigma^* = \sigma_1 + i\sigma_2$$

$$\sigma_1 = \omega \epsilon_2 \epsilon_0$$

$$\sigma_2 = \omega \epsilon_1 \epsilon_0$$



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสง เชิงซ้อน (σ_1) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสง เชิงซ้อน (σ_2) กับ ความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

4.3.5 การหาค่าฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีส

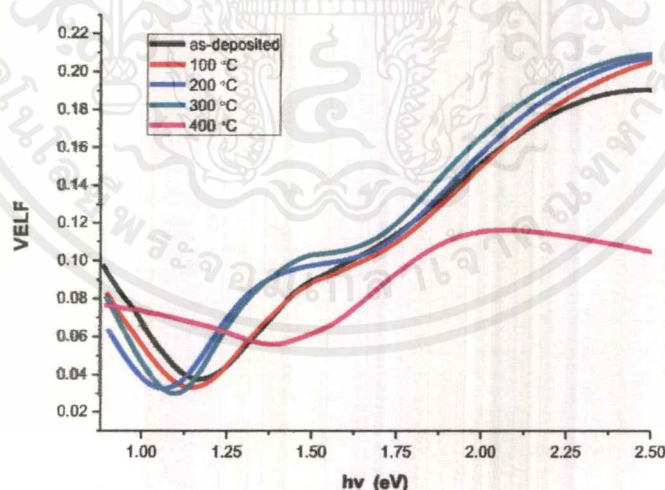
เมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านเข้าไปในฟิล์มบางพลังงานของโฟตอนจะมีการสูญเสียขณะเดินทางเข้าไปในเนื้อสาร ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร (Volume Energy Loss Function, VELF) ดังสมการ

$$VELF = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}$$

พลังงานโฟตอนจะมีการสูญเสียไปที่บริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียเชิงพื้นผิว (Surface Energy Loss Function, SELF) ดังสมการ

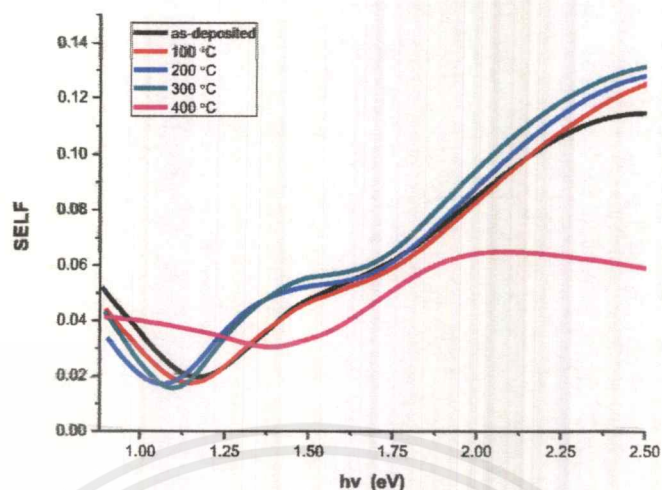
$$SELF = \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 1)^2 + \epsilon_2^2}$$

โดยปกติ VELF จะมีค่ามากกว่า SELF อย่างไรก็ตามทั้ง VELF และ SELF จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่พลังงานโฟตอนสอดคล้องกับ E_g

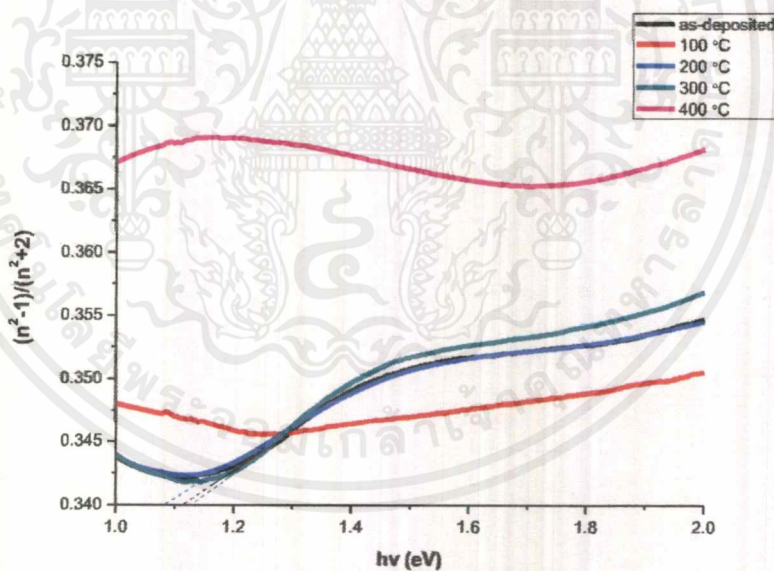


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตรกับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่กับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)/(n^2+2)$ กับ (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน (electronic polarizability, α_p) คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right) = \frac{4\pi Nd\alpha_p}{3M} + hv$$

จากจุดตัดแกน y จะได้ว่า

$$\alpha_p = \frac{3M}{4\pi Nd} \quad (\text{จุดตัดแกน } y)$$

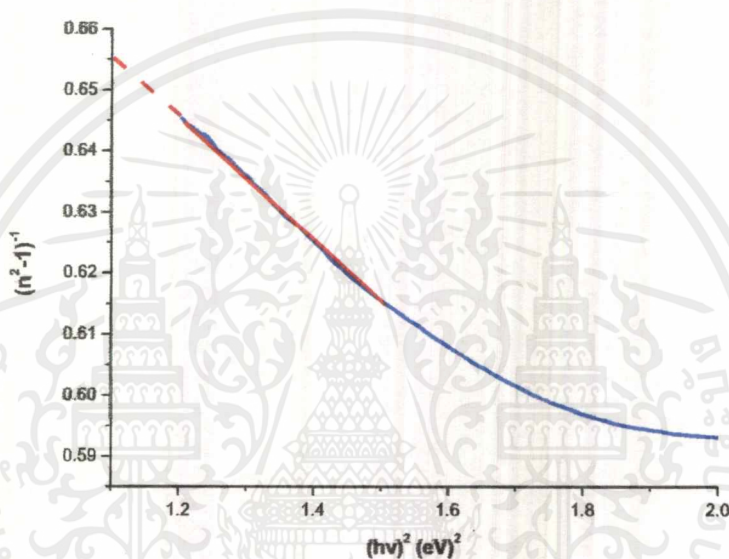
ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ความยาวคลื่น 1250 nm.

Annealing Temperature (°C)	n	k	ϵ_1	ϵ_2	σ_1 ($\Omega\cdot\text{m}$) ⁻¹	σ_2 ($\Omega\cdot\text{m}$) ⁻¹	α_p
As-deposited	1.605	0.128	2.546	0.471	6.30×10^3	3.49×10^4	8.50×10^{-24}
100	1.612	0.114	2.580	0.373	4.95×10^3	3.48×10^4	-
200	1.597	0.076	2.572	0.246	3.29×10^3	3.49×10^4	8.53×10^{-24}
300	1.606	0.103	2.574	0.311	4.08×10^3	3.52×10^4	8.45×10^{-24}
400	1.655	0.169	2.704	0.561	7.5×10^3	3.73×10^4	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีสโดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

เวมเพิม-โดโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.16-4.17 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (hv)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (hv)^2$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.100) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d}$$

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d}$$

จากสมการของความชันและจุดตัดแกน y สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e$$

เมื่อ

$$\beta = 0.26 \pm 0.03 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

N_c = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

Z_a = ค่าวาเลนซีของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซึ่งคเบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

N_e = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

และ $f = E_0 E_d$ คือค่าความแรงของออสซิลเลเตอร์ (oscillator strength) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่ r ของสเปกตรัมทางแสง (r^{th} moments of the optical spectra) จะสัมพันธ์กับ $E_0 E_d$ ดังนี้ คือ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}}$$

เมื่อ M_{-1} และ M_{-3} คือค่าโมเมนต์ของสเปกตรัม ของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง เมื่อเป็นกรณีโมเมนต์ลำดับที่ M_{-1} และ M_{-3} ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ M_{-1} และ M_{-3} จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (ϵ_∞) (dielectric constant at higher wavelength) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคอปซี $n = a + (b/\lambda^2)$ เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงค่าอนันต์แล้วในพจน์ของ (b/λ^2) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (ϵ_∞) จึงมีค่าเท่ากับ a และจากสมการที่ $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรดได้

พลังงานแลตทิซ (Lattice Energy, E_g) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$n^2 = 1 + \frac{E_d E_0}{(E_0^2 + E^2)} - \frac{E_l^2}{E^2}$$

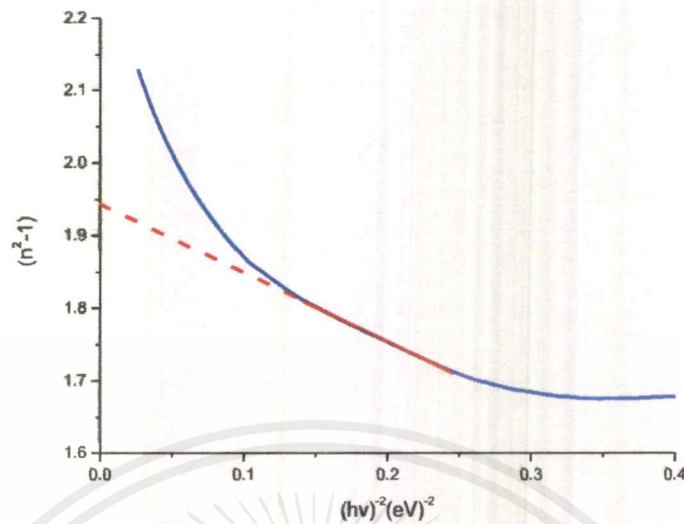
$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{\left(E_0 - \frac{E^2}{E_0}\right)} - \frac{E_l^2}{E^2}$$

เมื่อพิจารณาที่ $E = E_0$ สมการจะกลายเป็น

$$n^2 - 1 = \frac{E_d}{E_0} - \frac{E_l^2}{E^2}$$

$$\text{slope} = -E_l^2$$

$$E_l = \sqrt{\text{slope}}$$



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า (n^2-1) กับ $(hv)^{-2}$ ของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที

ค่าดัชนีหักเหสถิต (Static Refractive Index, n_0) จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$n_0 = \left(1 + \frac{E_d}{E_0}\right)^{1/2}$$

4.3.7 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนัลและไมแอนนัลโดยอาศัยแบบจำลองเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ (Sellmeier Oscillator)

โดยปกติสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ค่าดัชนีหักเหของแสงจะแสดงดังสมการ

$$n^2 - 1 = \frac{(e^2 / \pi mc^2) NS_0}{(1/\lambda_0^2 - 1/\lambda^2)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

λ_0 คือ ความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยของทรานซิชันระหว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_0 คือ ความเข้มแรงของออสซิลเลเตอร์จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ในแบบของเซลไม

เออร์ออสซิลเลเตอร์ตั้งความสัมพันธ์

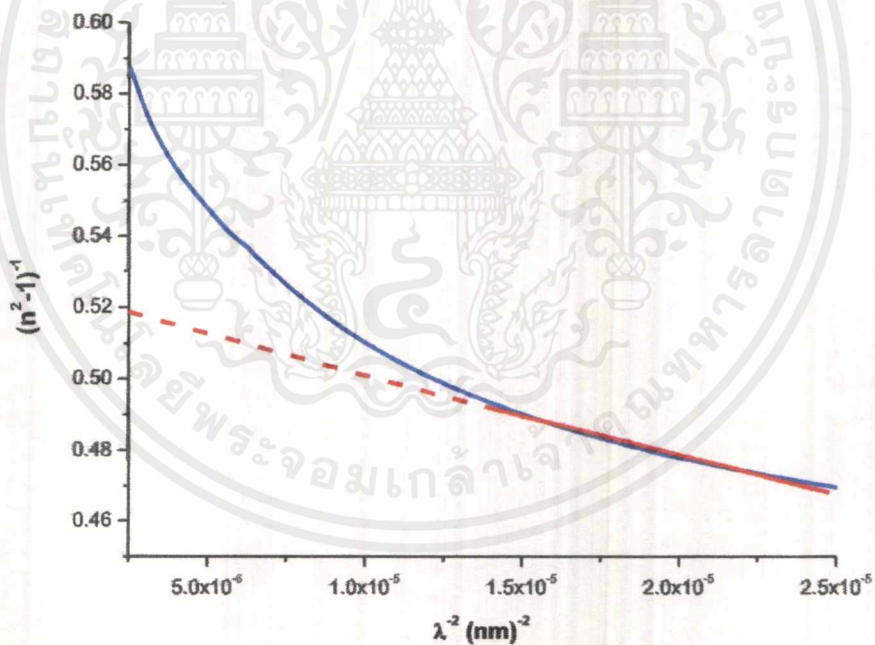
$$\frac{n_\infty^2 - 1}{n^2 - 1} = 1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^2$$

หรือ
$$\frac{1}{n^2 - 1} = \frac{1}{S_0 \lambda_0^2} - \frac{1}{S_0} \left(\frac{1}{\lambda^2} \right)$$

โดยที่ $slope = \frac{1}{S_0}$, จุดตัดแกน $y = \frac{1}{S_0 \lambda_0^2}$, $\lambda_0 < 500 \text{ nm}$

และ
$$S_0 = \frac{n_\infty^2 - 1}{\lambda_0^2}$$

n_∞ คือ ค่าดัชนีหักเหที่ความถี่สูง



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ $(\lambda)^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

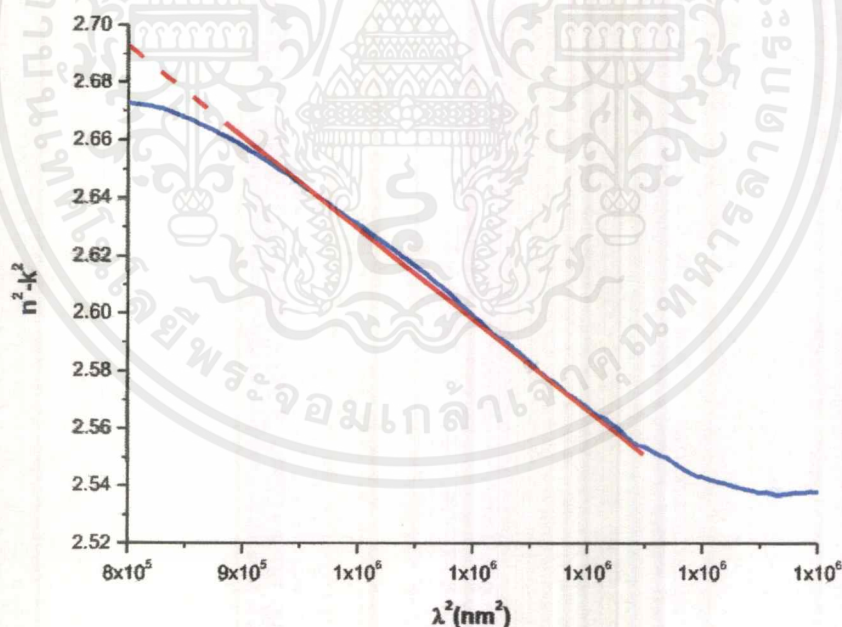
4.3.8 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไมแอนนีสโดยอาศัยแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน (Spitzer-Fan model)

ค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่สูงมีผลจากการสั้นของทั้งพาหะอิสระและแลตทิซ ค่าดัชนีหักเหของแสง (n) และอัตราส่วนของพาหะอิสระต่อมวลยังผล (N/m^*) หาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L - \left(\frac{e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0} \right) \left(\frac{N}{m^*} \right) \lambda^2$$

โดยที่ จุดตัดแกน $y = \epsilon_L$, $\text{slope} = \frac{e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0} \left(\frac{N}{m^*} \right)$

เมื่อ ϵ_0 คือ เฟอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (8.85×10^{-14} F/cm)



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2 - k^2)$ กับ λ^2 ของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนีส 60 นาที

ความถี่พลาสมา (ω_p) สามารถคำนวณได้จาก

$$\omega_p = \frac{e^2}{\epsilon_\infty} \left(\frac{N}{m^*} \right)$$

สมการสปีตเซอร์-แพนอาจเขียนอยู่ในรูปของสภาพซึมซาบได้ทางไฟฟ้า (Electric susceptibility,

χ_e) ดังสมการ

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L - \left(\frac{e^2}{4\pi c^2 \epsilon_0} \right) \left(\frac{N}{m^*} \right) \lambda^2$$

เมื่อ

$$\frac{e^2}{\pi c^2} \left(\frac{N}{m^*} \right) \lambda^2 = -4\pi\chi_e$$

และ

$$P = \epsilon_0 \chi_e \xi$$

โดยที่ P และ ξ คือ โพรราโรเซชันและสนามไฟฟ้าตามลำดับ

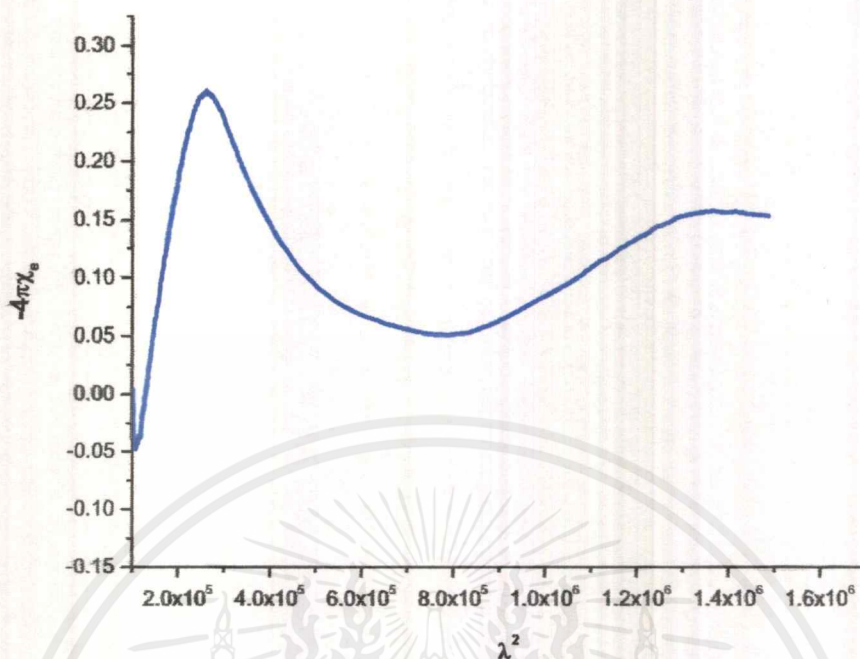
จากความสัมพันธ์

$$\epsilon_r = \epsilon_L + 4\pi\chi_e$$

$$\epsilon_r = n^2 - k^2 = \epsilon_L + 4\pi\chi_e$$

$$-4\pi\chi_e = \epsilon_L - (n^2 - k^2)$$

โดยที่ $-4\pi\chi_e$ ได้มาจาก $\epsilon_L - (n^2 - k^2)$



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(-4\pi x_c)$ กับ λ^2 ของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที

จะเห็นได้ว่า x_c ของพาหะอิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเพียงพอที่จะปลดค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยเฉพาะในย่านอินฟราเรด

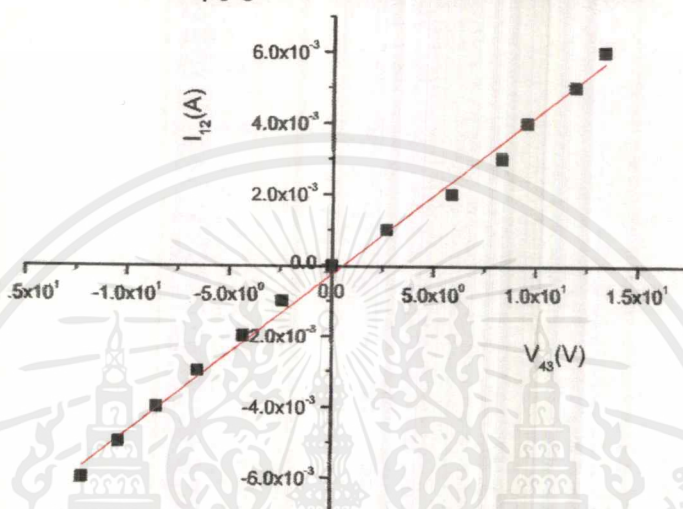
ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยอาศัยแบบจำลองออสซีเลเตอร์เดี่ยวแบบจำลอง

เซลล์เมเจอร์และแบบจำลองสปีดเซอร์-แพน

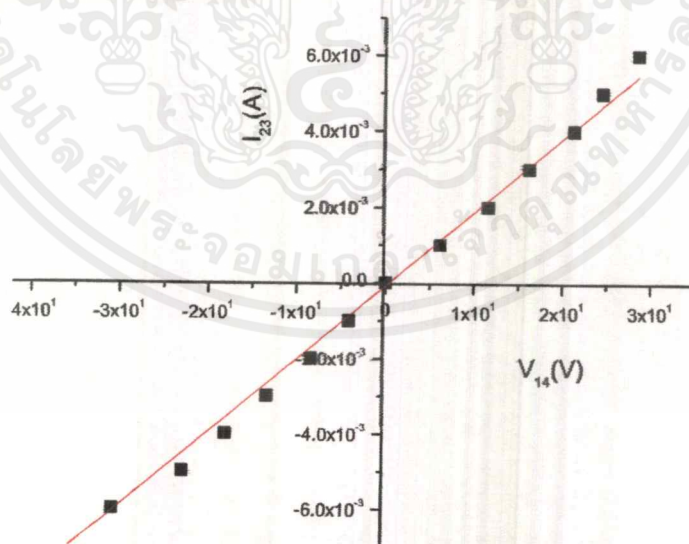
Annealing Temperature $^{\circ}\text{C}$	E_0 (eV)	E_d (eV)	M_{-1}	M_{-3} (eV) ⁻²	f	n_0	N_c	E_L (eV)	ϵ_{∞}	λ_0 (nm)	S_0 (10 ¹⁴ S ⁻²)	ϵ_L	$\frac{N}{m^*}$ (cm ⁻³ .g ⁻¹)	W_p (10 ¹⁴ S ⁻¹)
200	2.805	3.685	1.314	0.167	10.336	1.521	0.576	0.948	2.657	112.2	1.40x10 ¹⁴	2.923	9.21x10 ⁵⁴	9.54x10 ¹⁴

4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่ง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำมาแอนนีส

4.4.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำมาแอนนีส

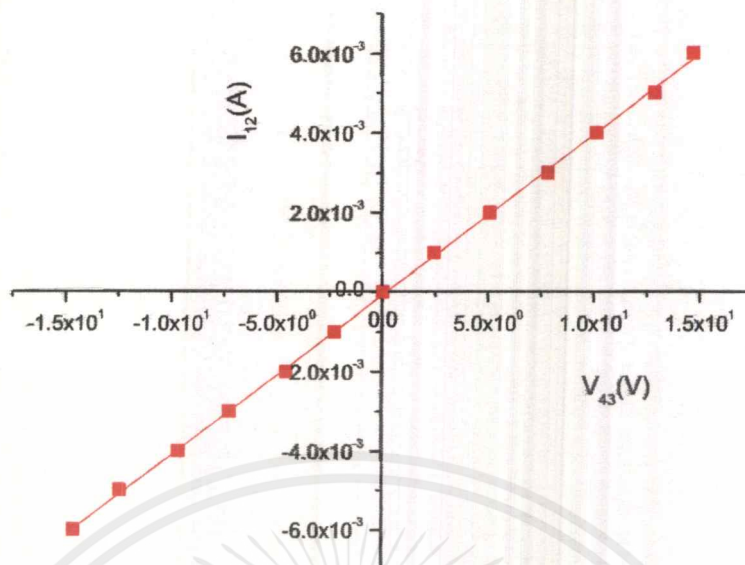


รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ไม่แอนนีส

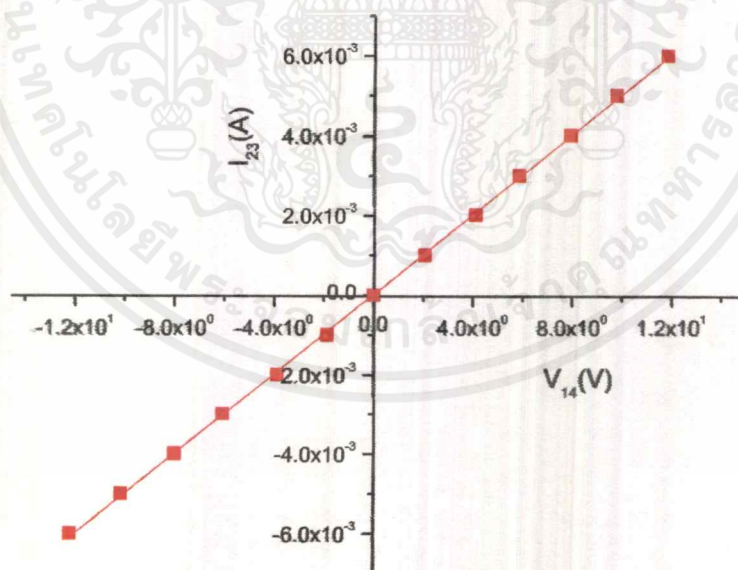


รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ไม่แอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

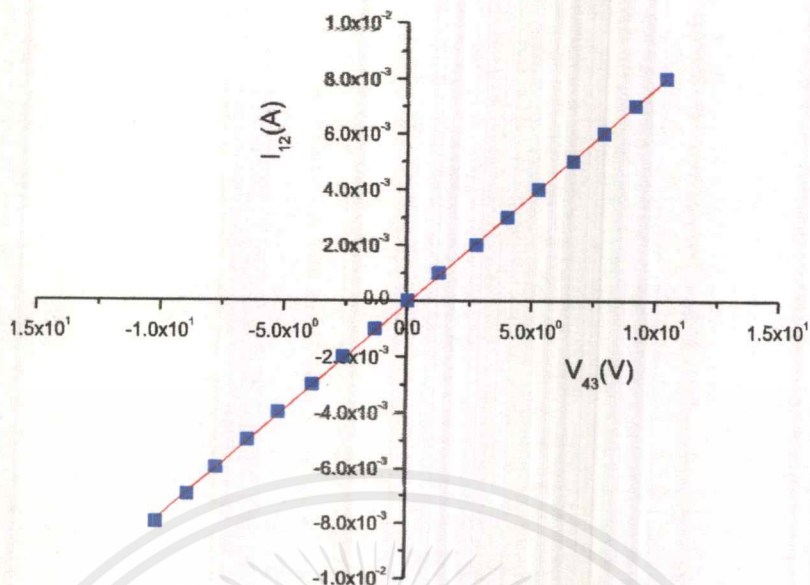


รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากกราฟค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

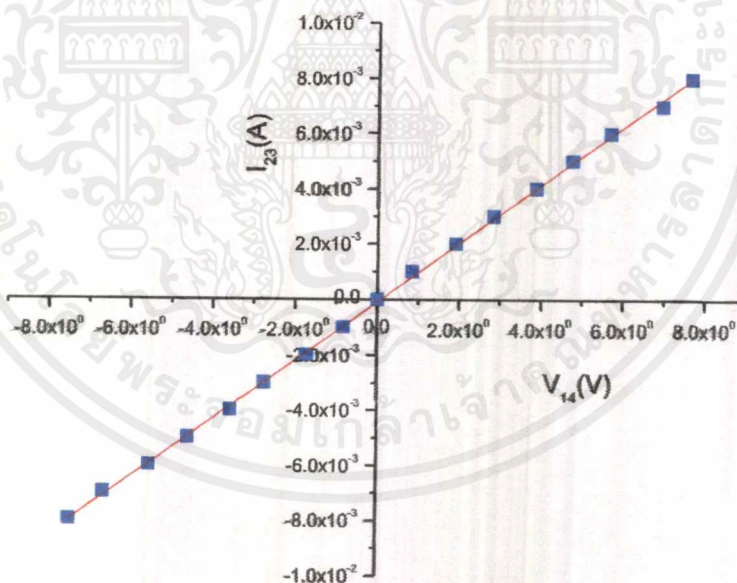


รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากกราฟค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

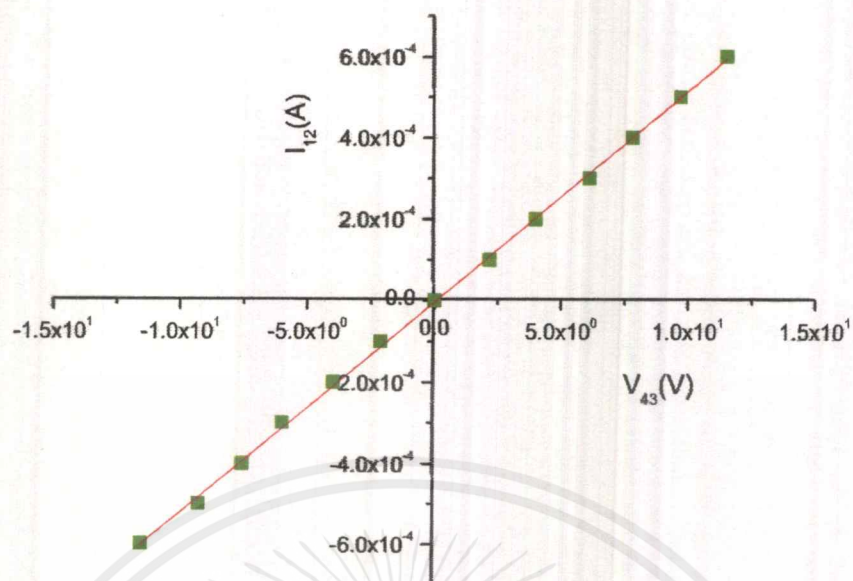
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



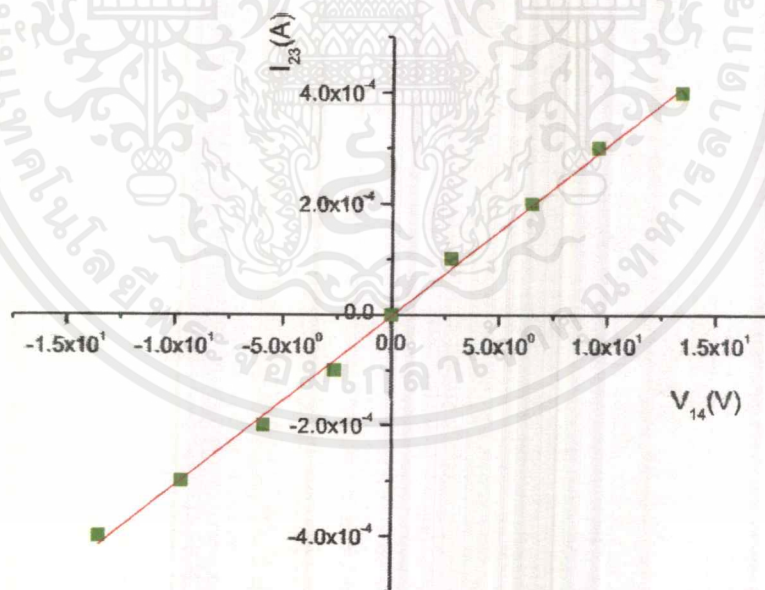
รูปที่ 4.34 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



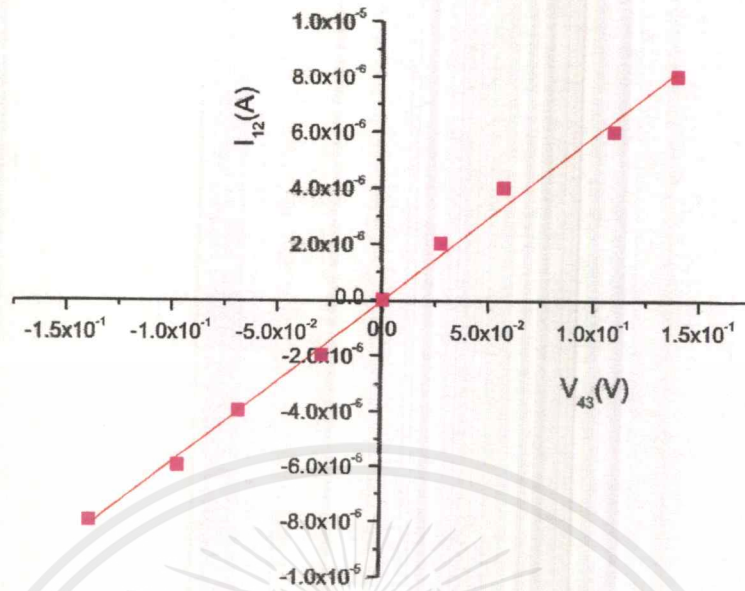
รูปที่ 4.35 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



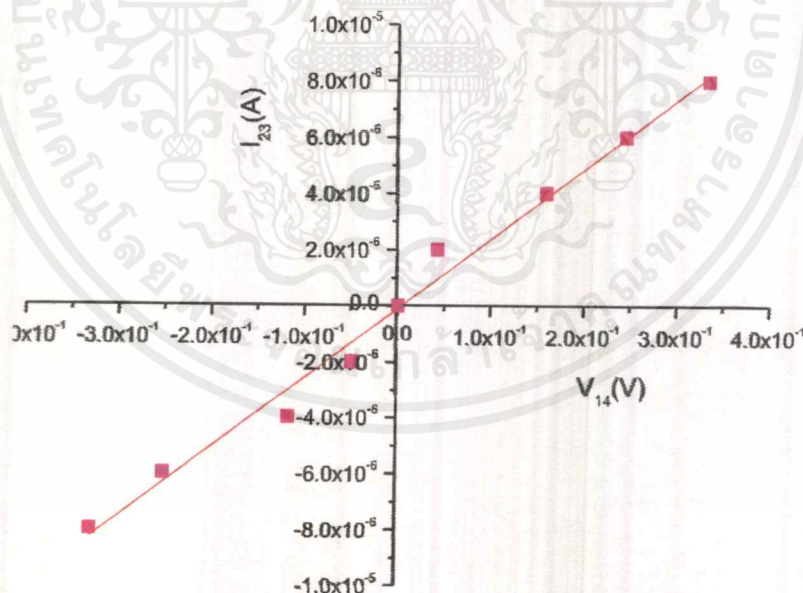
รูปที่ 4.36 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยใช้วิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.37 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยใช้วิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



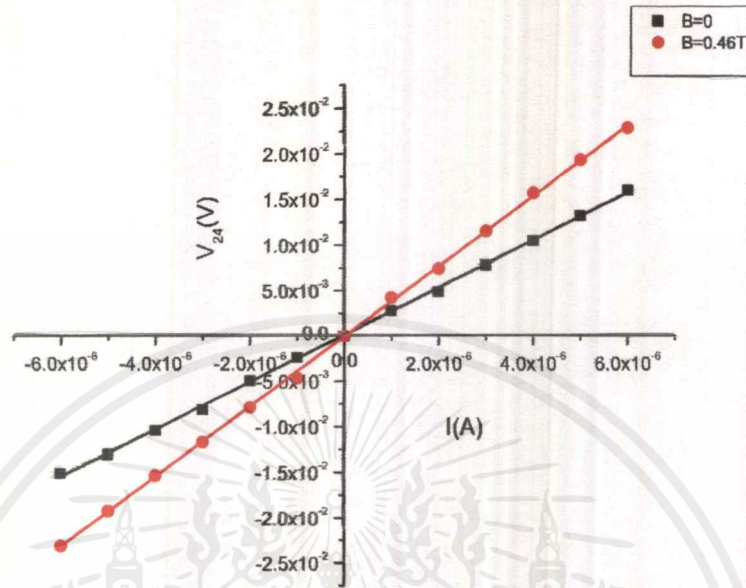
รูปที่ 4.38 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



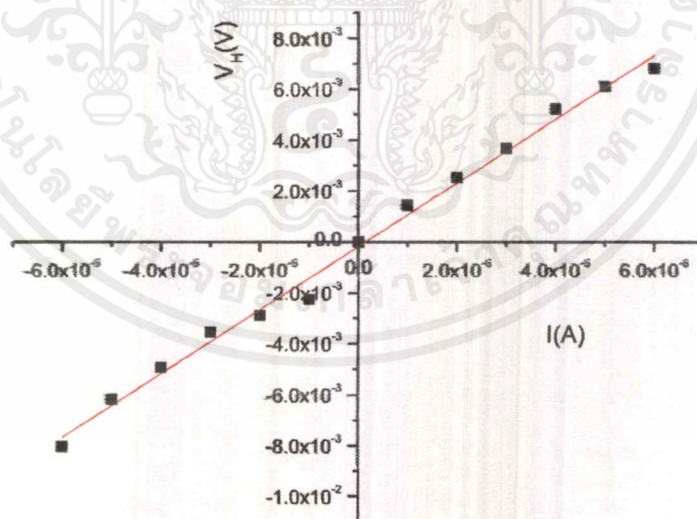
รูปที่ 4.39 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

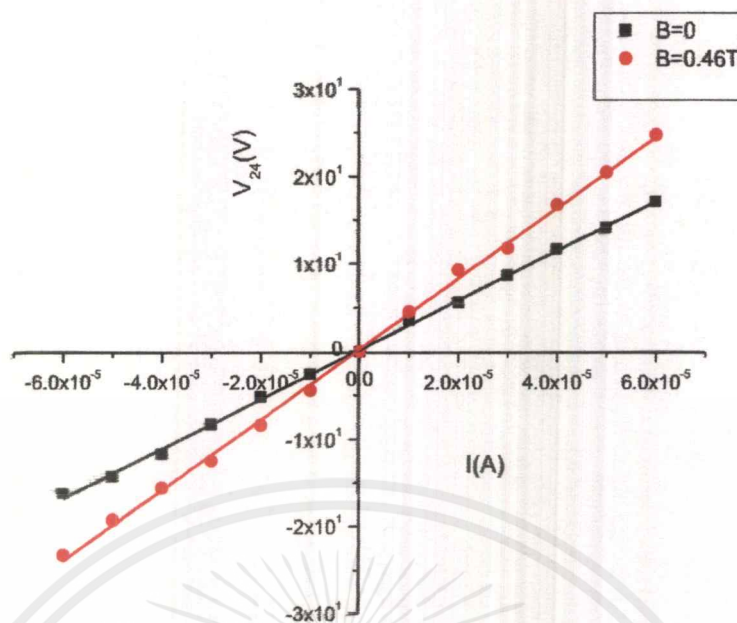
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนเนิลและนำมาแอนเนิล



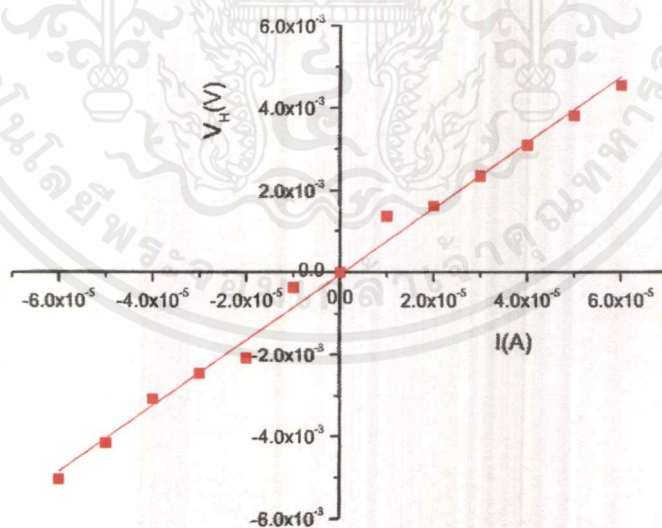
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่ไม่แอนเนิล



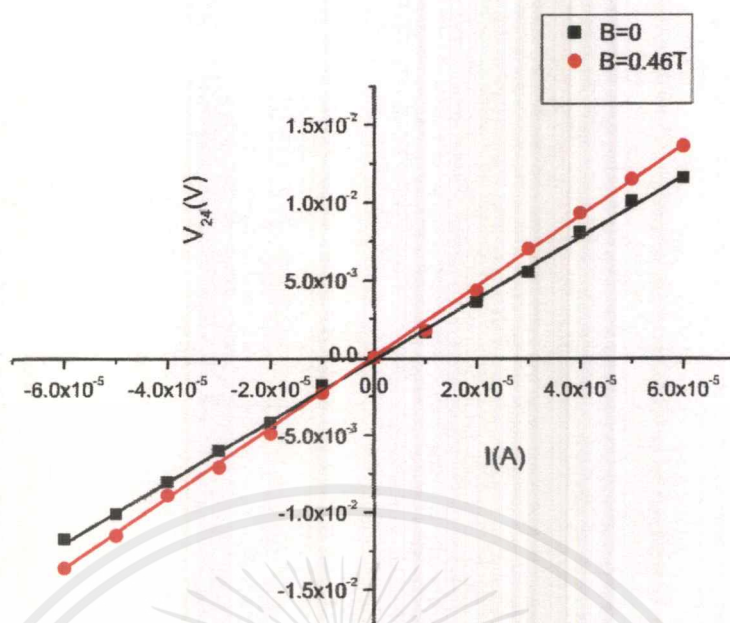
รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่ไม่แอนเนิล



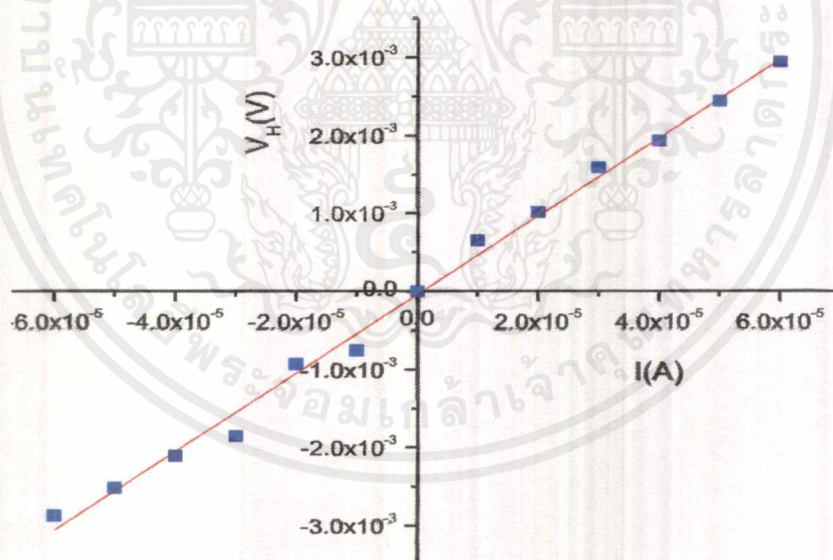
รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



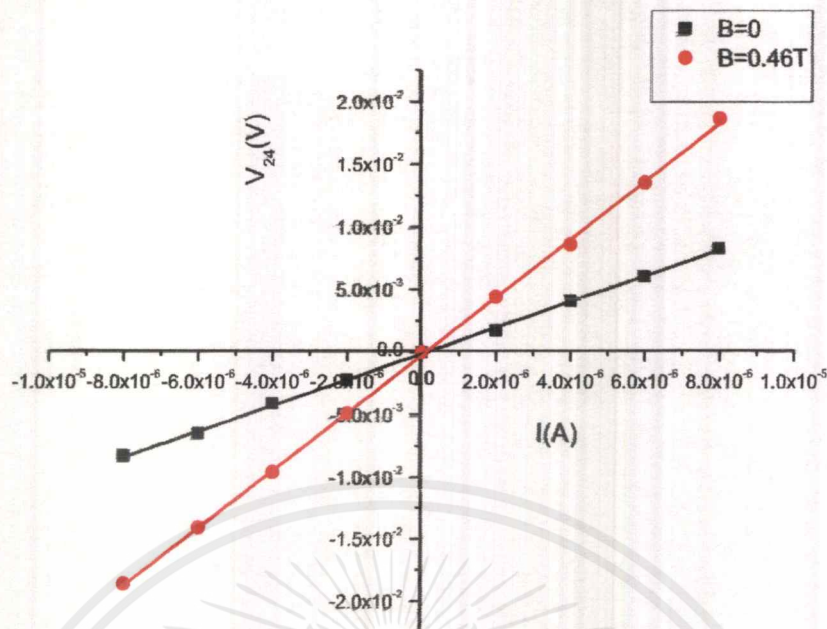
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



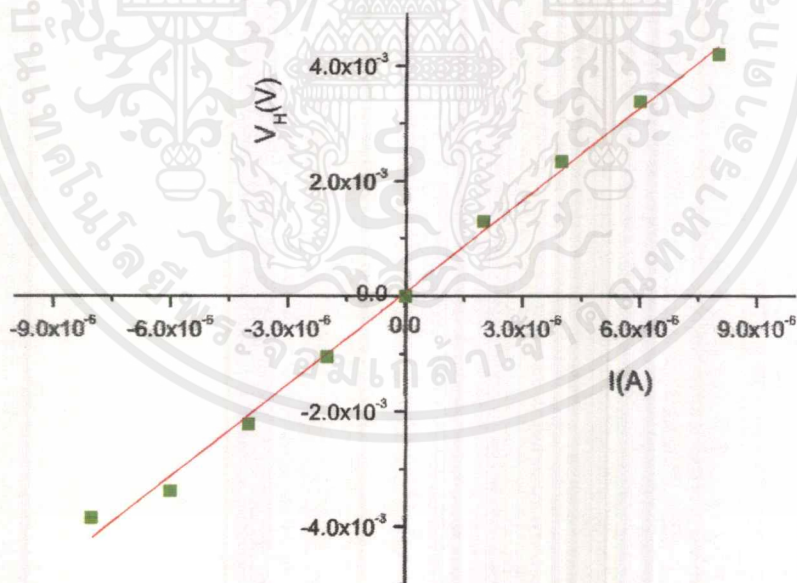
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



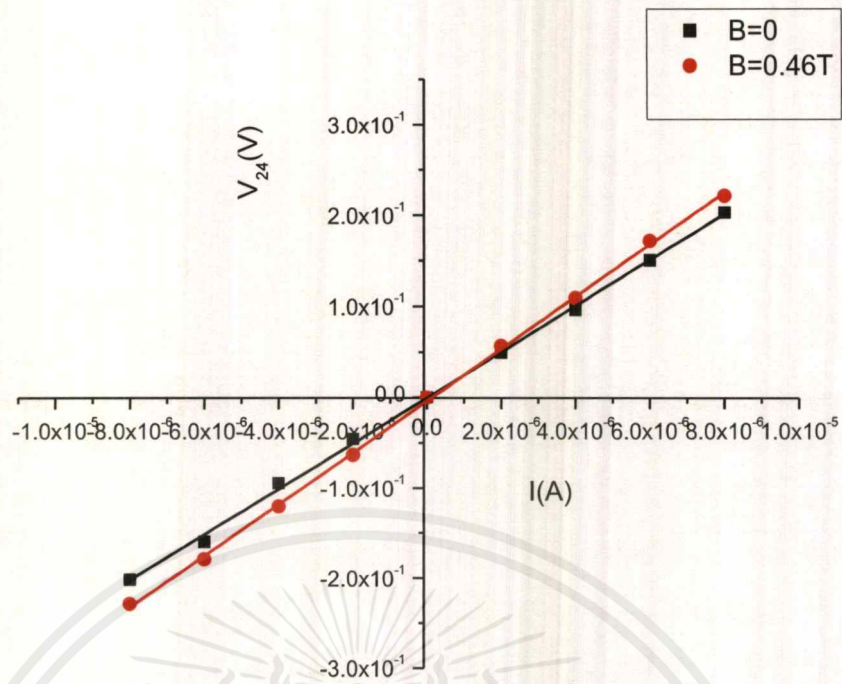
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



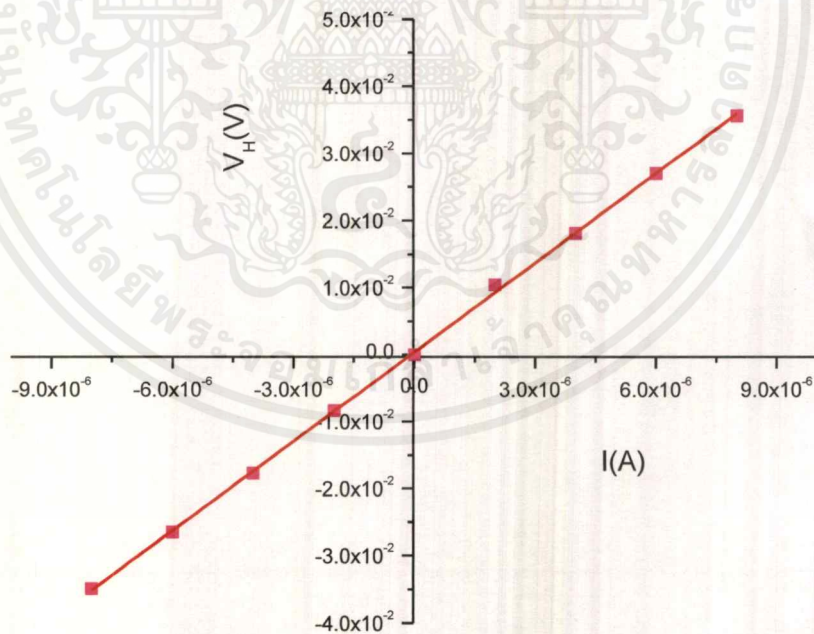
รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



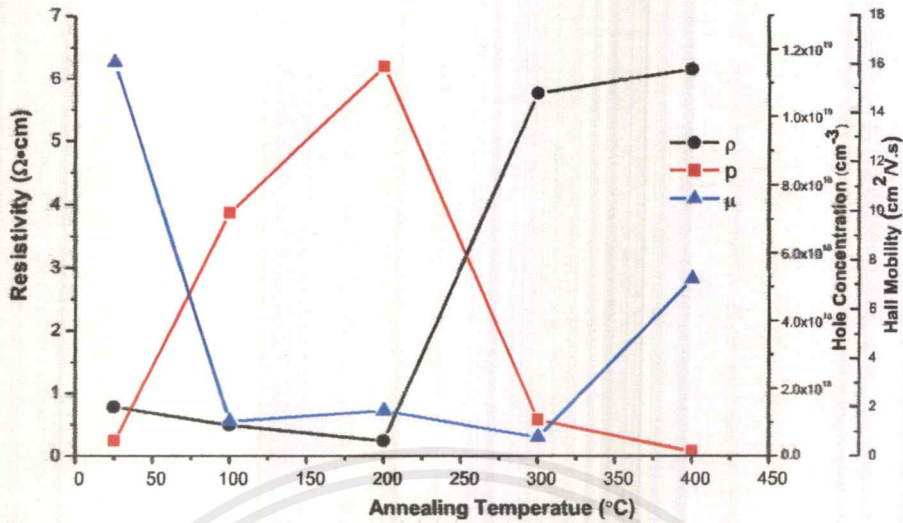
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีสและไม่แอนนีส

Annealing Temperature (°C)	Resistivity (Ω·cm)	Hall Constant (cm ³ /C)	Hole Concentration (cm ⁻³)	Hall Mobility (cm ² /V·s)
As-deposited	0.79	13.59	4.60 × 10 ¹⁷	17.20
100	0.50	0.87	7.29 × 10 ¹⁸	1.72
200	0.25	0.54	1.15 × 10 ¹⁹	2.16
300	5.76	5.78	1.08 × 10 ¹⁸	1.01
400	6.15	48.22	1.29 × 10 ¹⁷	7.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ นำมาแอนนัลและไม่แอนนัล

ในช่วงอุณหภูมิต่ำระหว่าง 300-200 เคลวิน พลังงานกระตุ้น (E_g) ที่คำนวณได้จากกราฟ $\ln\sigma$ กับ $1000/T$ คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับผู้รับ (acceptor level) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่ออุณหภูมิต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับผู้รับ (ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี) ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้รับจะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour acceptors) ซึ่งระดับพลังงานผู้รับเหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้รับที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\sigma$ กับ $1000/T$ ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right)$$

โดยที่

$$E_{NNH} = \frac{0.99e^2 N_a^{1/3}}{4\pi\epsilon_s}$$

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่

N_a คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้รับ (acceptor concentration)

E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตีของ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ (มีค่าเท่ากับ $7.5067 \times 8.85 \times 10^{14}$ ฟารัดต่อเซนติเมตร)

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{CI} = \frac{e^2 N_a^{2/3} \epsilon_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B}$$

ใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ ค่า k นี้คือ อัตราส่วนของ $\frac{N_d}{N_a}$ (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F)e^2}{2\varepsilon_s} \right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d} \right)^{1/2}$$

เมื่อ N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่า N_a ได้จากค่า E_{NNH} จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่า k ได้จากค่า $N_0(E_F)$ และ N_d เมื่อรู้ค่า k แล้วก็จะคำนวณหาค่า N_a ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิชัน (T_{CI}) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า ξ_{Mott}, N_d และ ε_s ตามลำดับ

จากสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{NNH}}{kT}\right)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_{0,NNH}$$

ความชัน คือ $\frac{E_{NNH}}{1000k}$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ $\ln \sigma_{0,NNH}$

ในช่วงอุณหภูมิ 300-200 เคลวิน พลังงานการกระตุ้นของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกันสามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp\left[\left(-\frac{T_0}{T}\right)^s\right]$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s}$$

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma T^{1/2} = \sigma_{0,Mott} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^{1/4}\right]$$

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = -\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^{1/4} + \ln \sigma_{0,Mott}$$

โดยที่องศาของความไม่เป็นระเบียบ ($T_{0,Mott}$) คือ

$$T_{0,Mott} = \frac{18.1}{k_B \xi_{Mott} N_0(E_F)}$$

ความชันของสมการ คือ $T^{1/4}_{0,Mott}$

ส่วน $\sigma_{0,Mott}$ คือสัมประสิทธิ์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma_{0,Mott} = 3e^2 v \left[\frac{N_0(E_F) \xi_{Mott}}{8\pi k_B} \right]^{1/2}$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length; ξ_{Mott}) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{21.23 \sigma_{0,Mott} T_{0,Mott}^{1/2}}$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state; $N_0(E_F)$) ที่ระดับเฟอร์มี คือ

$$N_0(E_F) = 2.0 \times 10^9 \sigma_{0,Mott}^3 T_{0,Mott}^{1/2}$$

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q} T_{0,Mott}}$$

หรือ

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,Mott}$) คือ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

หรือ

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9\xi_{Mott}}{8\pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{1/4}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,Mott}$) คือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{k_B T}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

หรือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_0(E_F)}$$

และ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} > 1$$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right)$$

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชอลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right]$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES}$$

โดยที่องศาความไม่เป็นระเบียบของ ES ($T_{0,ES}$) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} ก็จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/2}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,ES}$) คือ

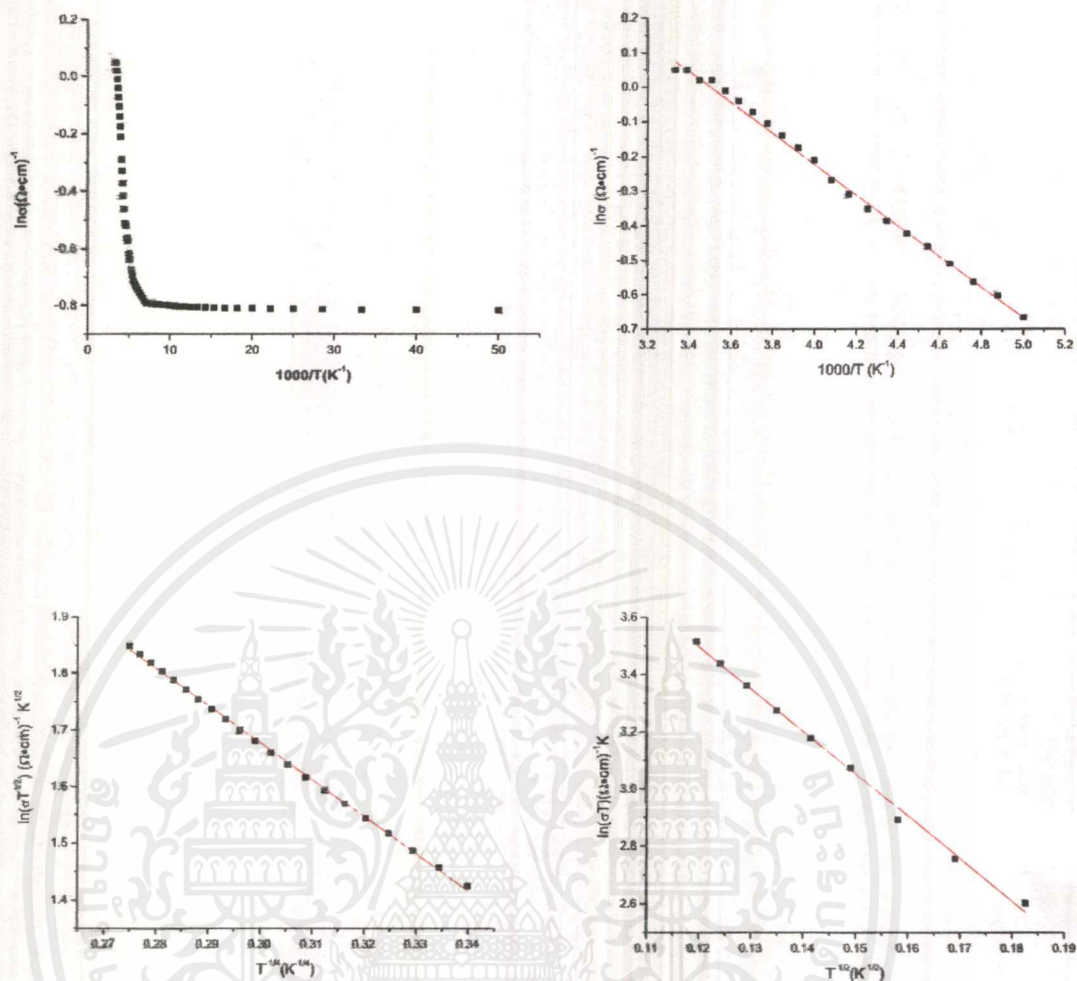
$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

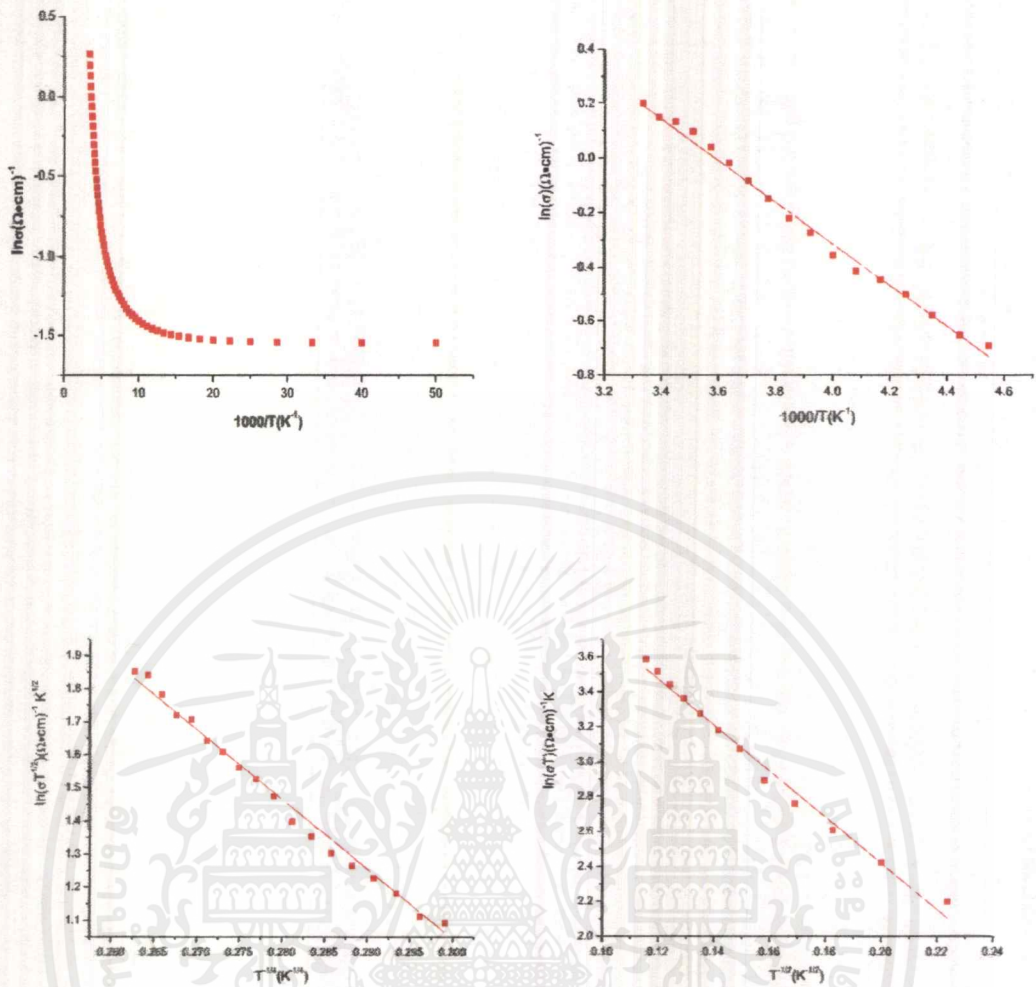
$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}}$$

หรือ

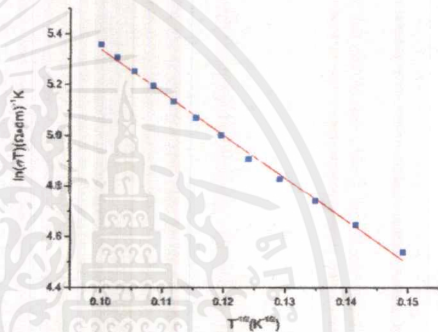
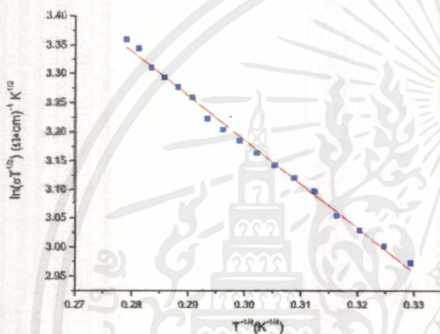
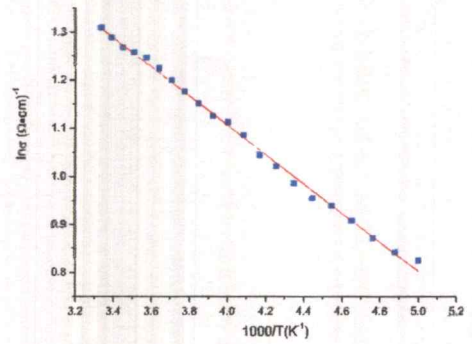
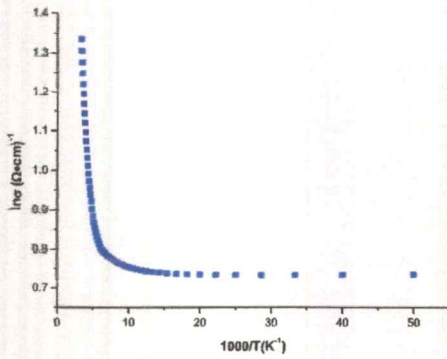
$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}^3}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2}$$



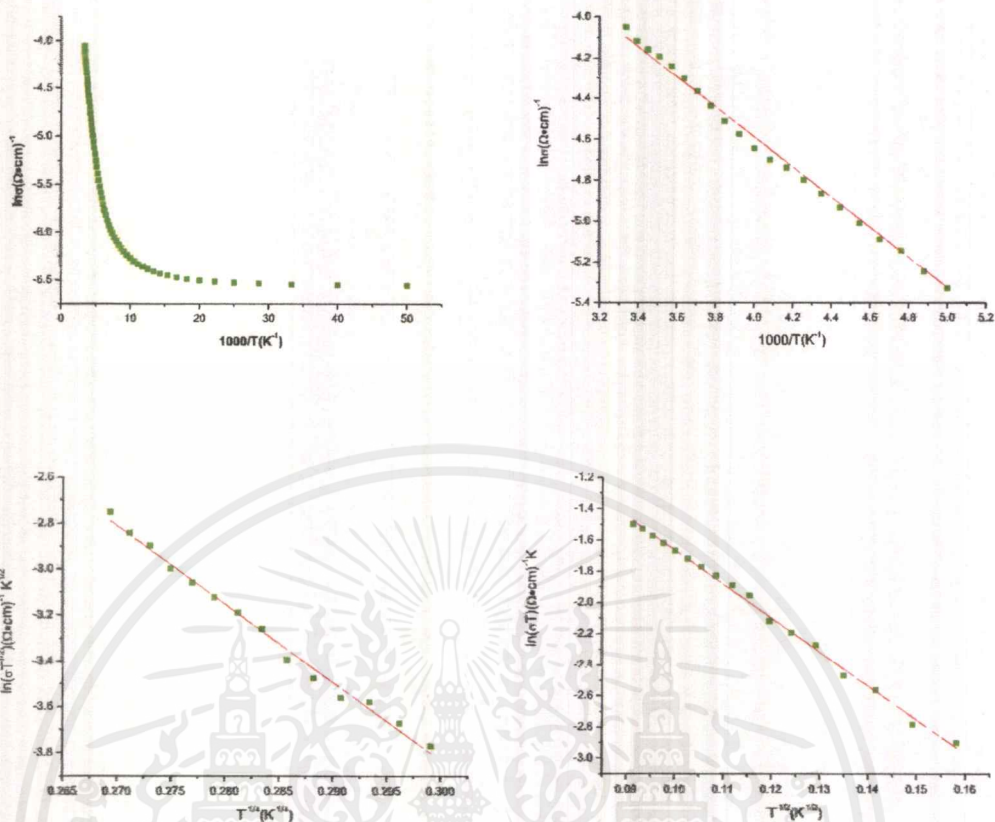
รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีส



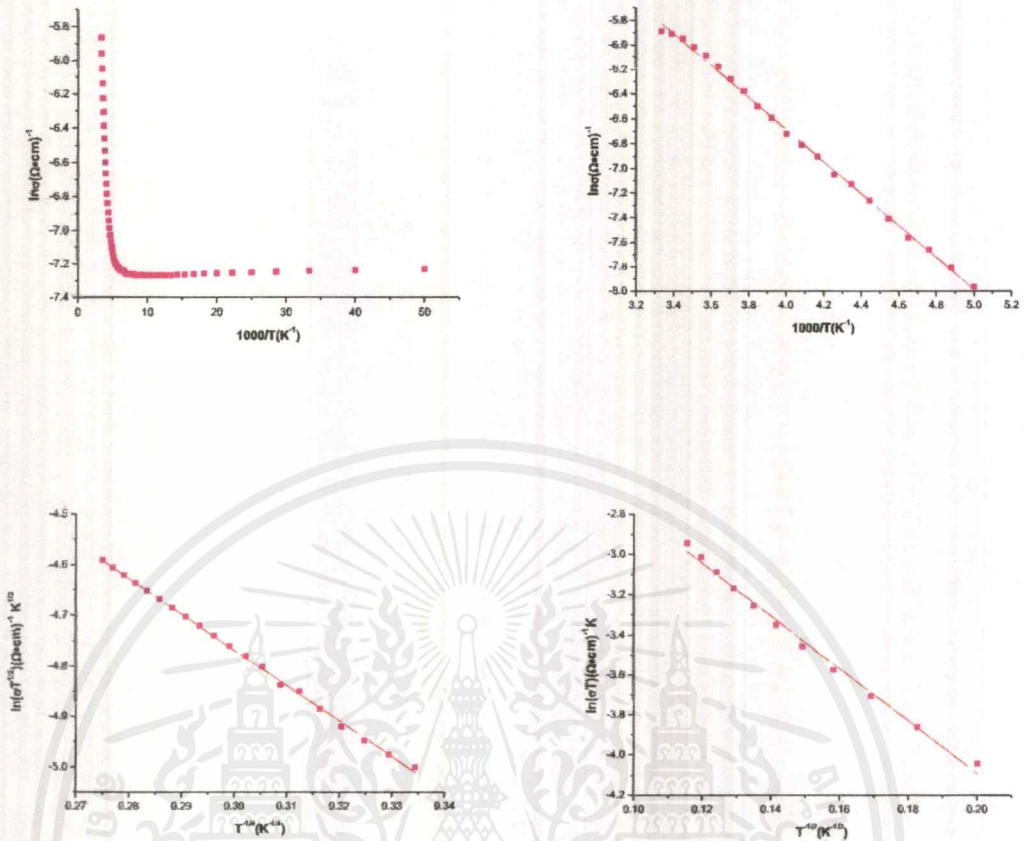
รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีลอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีลอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ,ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนีลอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $1000/T$, ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $T^{-1/4}$ และ ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแอนนัลอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหา NNH, Mott-VRS และ ES-VRS จากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Nearest Neighbour Donors ช่วงอุณหภูมิ 220-300 เคลวิน

$$y = mx + c ; y = -0.761x - 2.729$$

จาก $c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$

$$\sigma_{0,NNH} = e^{2.729} = 15.31s/cm$$

$$E_{NNH} = \frac{-1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.761)}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.065eV$$

$$N_d = \left(\frac{0.065(1.6 \times 10^{-19})(4\pi)(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right)^3 = 4.14 \times 10^{19} cm^{-3}$$

$$T_{C1} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.14 \times 10^{19})^{2/3} (6.626 \times 10^{-8})}{4\pi(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})(1.38 \times 10^{-23})} = 176.18K$$

ES-VRHช่วงอุณหภูมิ 40-100 เคลวิน

$$y = mx + c; y = -16.79x - 4.7759$$

$$\text{จาก } c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$$

$$\sigma_{0,ES} = e^{4.7759} = 1.1862 \times 10^2 s/cm$$

$$T_{0,ES} = (-16.79)^2 = 2.819 \times 10^2 K$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(2.819 \times 10^2)(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})} = 2.77 \times 10^{-5} cm$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} = \frac{1}{4} \left(\frac{2.819 \times 10^2}{100} \right)^{1/2} = 0.4197$$

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} = \frac{1}{2} (1.38 \times 10^{-23})(100) \left(\frac{2.819 \times 10^2}{100} \right)^{1/2} = 7.24 \times 10^{-3} eV$$

$$T_{C2} = \frac{16T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} = \frac{16(2.819 \times 10^2)^2}{1.984 \times 10^5} = 6.40K$$

$$\Delta C = \frac{k_B}{q} \left(\frac{T_{0,ES}^3}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{(2.819 \times 10^2)^3}{2.819 \times 10^5} \right)^{1/2} = 9.17 \times 10^{-4} eV$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mott-VRH ช่วงอุณหภูมิ 125-210 เคลวิน

$$y = mx + c ; y = -21.1062 + 7.37499$$

$$\text{จาก } c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$$

$$\sigma_0 = e^{7.37499} = 1.60 \times 10^3 \text{ s/cm}$$

$$T_0 = (-21.1062)^4 = 1.98 \times 10^5 \text{ K}$$

$$T_0 = \frac{18 \alpha^3}{\frac{k}{q} N_{0(E_F)}} ; \alpha = 1.24 \times 10^7 \text{ cm}^{-1} ; \alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{1/2} = 1.509 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$$

$$N_{0(E_F)} = \frac{18 \alpha^3}{\frac{k}{q} T_0} = \frac{18 (1.509 \times 10^7)^3}{\left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (1.98 \times 10^5)} = 3.613 \times 10^{21} \text{ cm}^{-1} \cdot eV^{-1}$$

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1.509 \times 10^7} = 6.626 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9}{8\pi \alpha \frac{k}{q} T N_{0(E_F)}} \right)^{1/4} = \left(\frac{9}{8\pi (1.509 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (210) (3.613 \times 10^{21})} \right)^{1/4}$$

$$= 1.379 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{1.3799 \times 10^{-7}}{6.62691 \times 10^{-8}} = 2.082$$

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_{0(E_F)}} = \frac{3}{4\pi (1.3799 \times 10^{-7})^3 (3.61361 \times 10^{21})} = 2.514 \times 10^{-2} \text{ eV}$$

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sg}(\text{S}_2\text{Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่เออนีลและนำไปแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

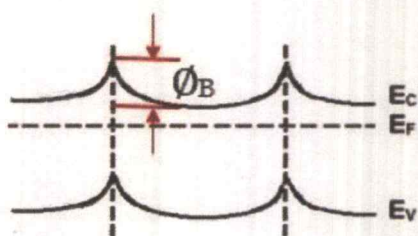
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$\sigma_{0,\text{NNH}}$ (s/cm)	E_{NNH} (eV)	N_d	T_{CI} (K)
As-deposited	4.73	0.038	8.22×10^{18}	72.94
100	15.31	0.065	4.14×10^{19}	176.18
200	10.16	0.026	2.60×10^{18}	23.95
300	0.19	0.063	3.69×10^{19}	136.96
400	0.22	0.112	2.05×10^{20}	624.03

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอดด์ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn(S,Se)}_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้วิธีวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอเนนนิลและนำไปแอนนิตที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

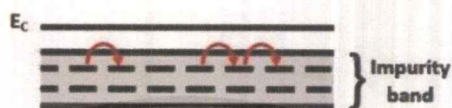
Annealing Temperature (°C)	$\sigma_{0,Mott}$ (cm)	$T_{0,Mott}$ (K)	α (cm^{-1})	$N_0(E_F)$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$)	$R_{hop,Mott}$ (cm)	$W_{hop,Mott}$ (eV)	ξ_{Mott} (cm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$
As-deposited	38.29	1.84×10^3	1.24×10^7	2.15×10^{21}	1.73×10^{-7}	2.14×10^{-2}	8.06×10^{-8}	2.15
100	1.60×10^3	1.98×10^5	1.51×10^7	3.61×10^{21}	1.38×10^{-7}	2.51×10^{-2}	6.63×10^{-8}	2.08
200	2.40×10^2	3.43×10^3	1.76×10^7	3.29×10^{23}	3.94×10^{-8}	1.19×10^{-2}	5.69×10^{-8}	0.69
300	6.06×10^2	1.35×10^6	1.50×10^7	5.20×10^{20}	2.30×10^{-7}	3.77×10^{-2}	6.66×10^{-8}	3.45
400	7.06×10^{-2}	2.48×10^3	1.24×10^7	1.60×10^{23}	5.88×10^{-8}	7.34×10^{-3}	8.06×10^{-8}	0.73

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จำนวนได้จากแบบการกระโดดแบบเอพโรส - ซลอปส์กีของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่เออนีลและนำไปแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

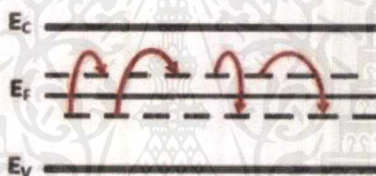
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$\sigma_{0,ES}$ (s/cm)	$T_{0,ES}$ (K)	ξ_{ES}	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$	$W_{hop,ES}$ (eV)	T_{Cz}	ΔC
As-deposited	1.94×10^2	2.18×10^2	3.85×10^{-5}	0.442	5.33×10^{-3}	412.76	6.46×10^{-3}
100	1.19×10^2	2.82×10^2	2.77×10^{-5}	0.419	7.24×10^{-3}	6.40	9.17×10^{-4}
200	1.12×10^3	2.85×10^2	2.75×10^{-5}	0.422	7.27×10^{-3}	376.98	7.04×10^{-3}
300	1.67	4.76×10^2	1.64×10^{-5}	0.498	1.03×10^{-2}	2.66	7.68×10^{-4}
400	0.23	1.71×10^2	4.57×10^{-5}	0.378	4.89×10^{-3}	188.85	3.88×10^{-3}



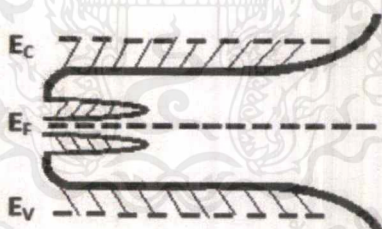
(ก)



(ข)



(ค)



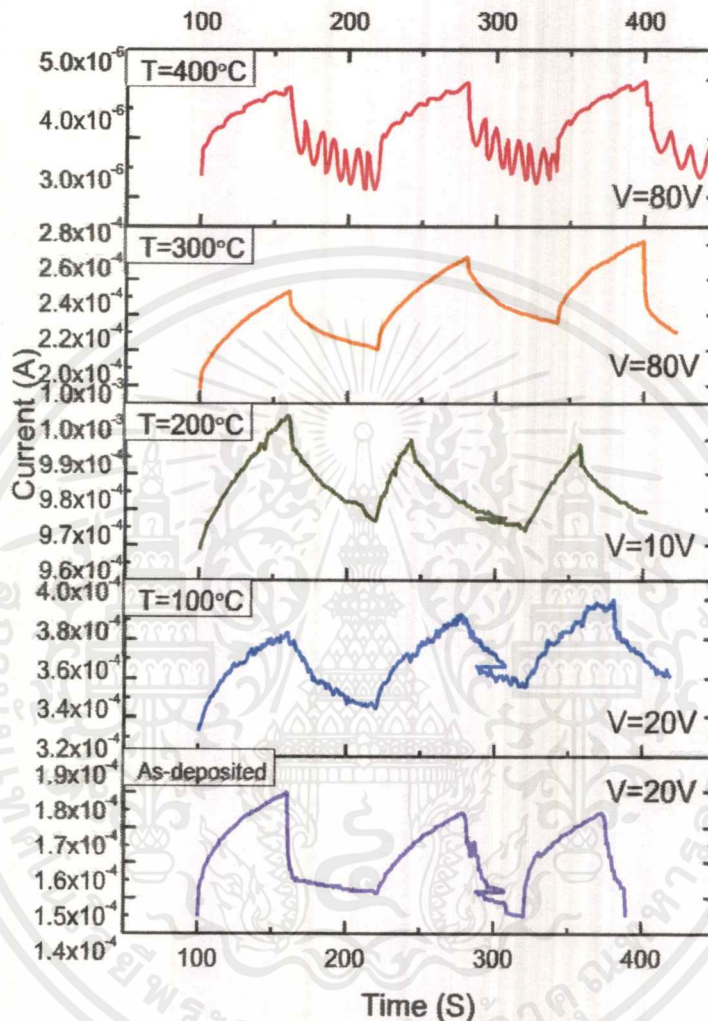
(ง)

รูปที่ 4.56 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

- (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโด
- (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
- (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่
- (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำมาแอนนีสและไมแอนนีส



รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัว $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดวีวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{\text{dark}}} \right) \times 100 \%$	$S = \frac{R_{\text{dark}}}{R_{\text{light}}}$
As-deposited	16.67	1.17
100	8.41	1.14
200	3.07	1.02
300	22.77	1.23
400	45.45	1.45

ในช่วงกระแสโฟโตชาลลงจะเป็นไปตามสมการ

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

จากการศึกษาพบว่าเวลาชาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

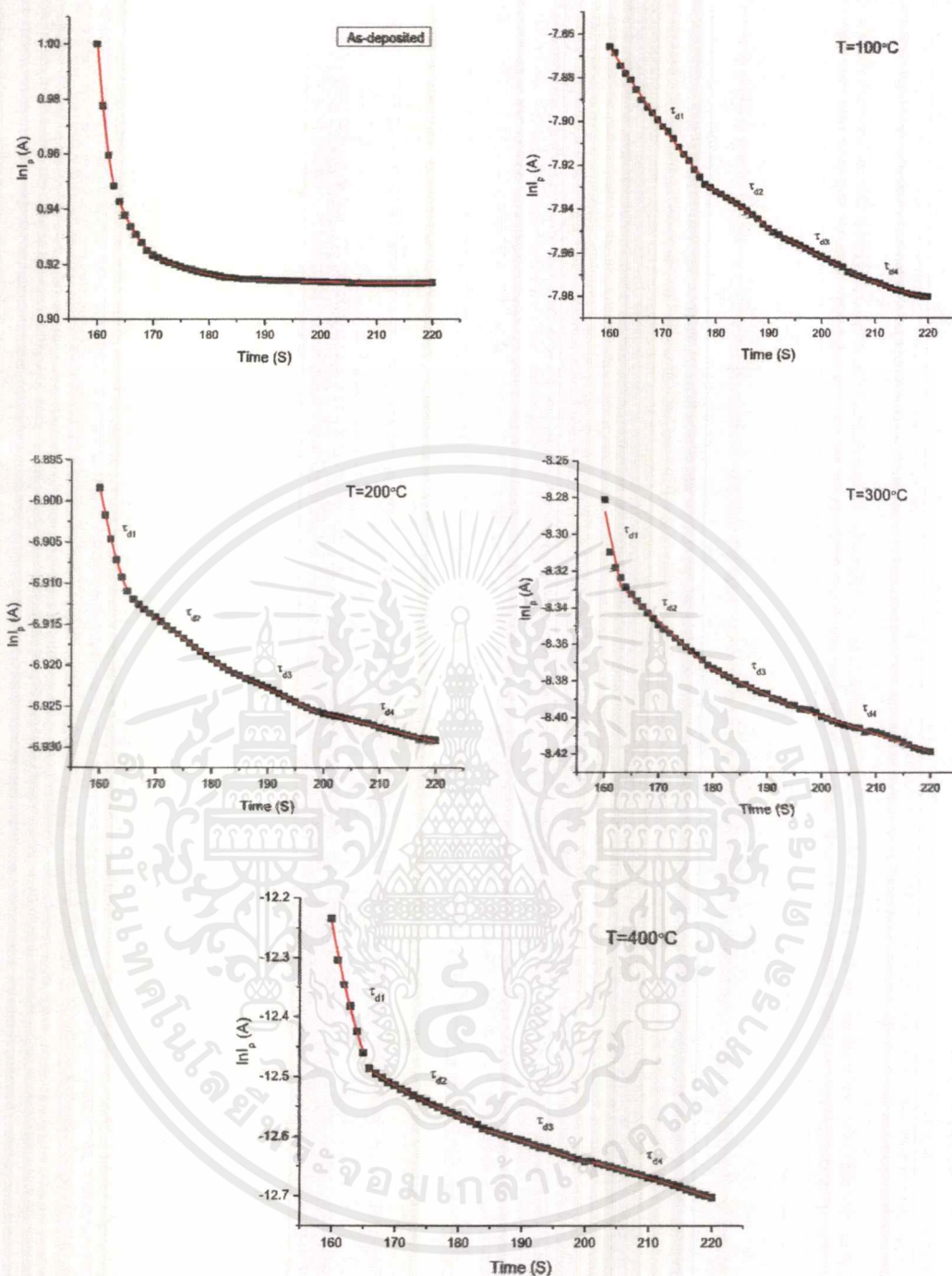
$$I = \sum_2^n A_{n-1} \left[\exp(-t/\tau_{dn}) \right] + A_n \left[\exp(-t/\tau_{dn})^\beta \right]$$

และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกับดักประจุได้จากสมการ

$$\sigma_i = \frac{\ln I_p}{q\mu V_a} \left(\frac{I}{w} \right)$$

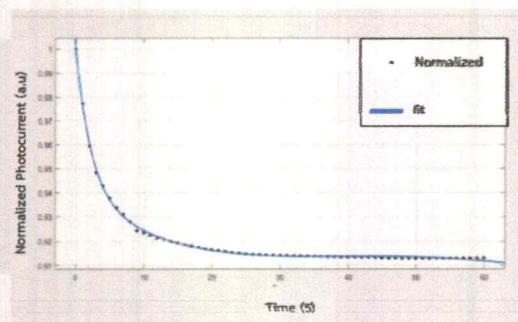
ผลการทดลองของกระแสโฟโตชาลลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิต้องของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

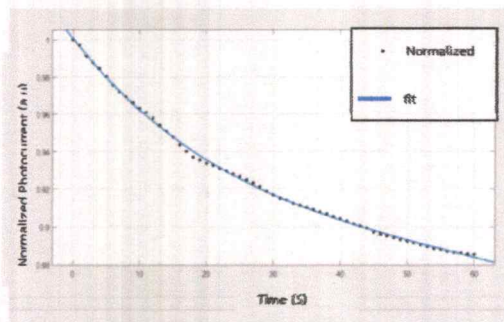
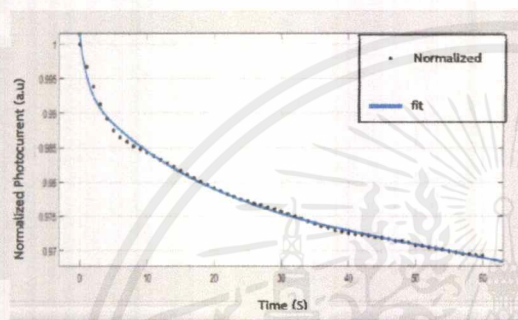
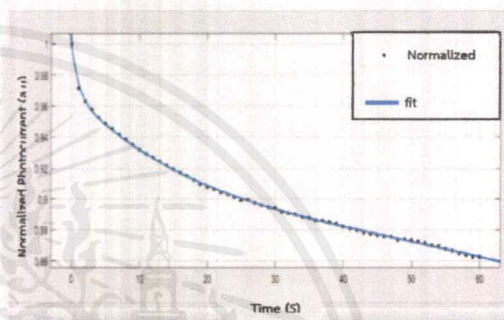
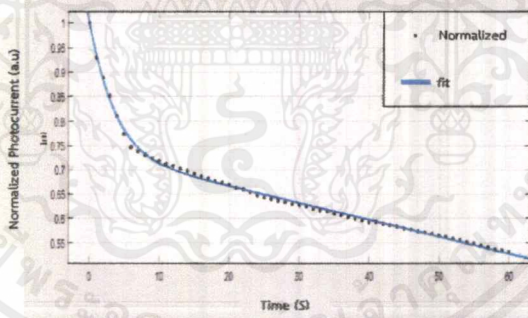


รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



As-deposited

 $T = 100^{\circ}\text{C}$  $T = 200^{\circ}\text{C}$  $T = 300^{\circ}\text{C}$  $T = 400^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.59 การพิกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอร์มัลไลซ์ชาลงกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอนนีสและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

Annealing Temperature (°C)	Decay Time (S)			
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 rd Term
As-deposited	$\tau_{d1}=15.00$ $A_1=4.063$	$\tau_{d2}=40.00$ $A_2=0.718$	$\tau_{d3}=90.00$ $A_3=-3.840$	$\tau_{d4}=195.75$ $A_4=0.059$ $\beta=0.1504$
100	$\tau_{d1}=10.56$ $A_1=-0.005$	$\tau_{d2}=38.73$ $A_2=0.647$	$\tau_{d3}=70.26$ $A_3=-1.261$	$\tau_{d4}=275.26$ $A_4=1.619$ $\beta=0.9884$
200	$\tau_{d1}=1.18$ $A_1=0.007$	$\tau_{d2}=95.13$ $A_2=-0.440$	$\tau_{d3}=652.00$ $A_3=1.280$	$\tau_{d4}=52.00$ $A_4=0.153$ $\beta=0.9419$
300	$\tau_{d1}=1.00$ $A_1=0.031$	$\tau_{d2}=70.00$ $A_2=-41.870$	$\tau_{d3}=100.00$ $A_3=11.390$	$\tau_{d4}=200.25$ $A_4=31.440$ $\beta=0.7858$
400	$\tau_{d1}=1.20$ $A_1=-0.024$	$\tau_{d2}=69.95$ $A_2=-1.031$	$\tau_{d3}=99.95$ $A_3=1.759$	$\tau_{d4}=200.20$ $A_4=0.295$ $\beta=0.2341$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากสภาพนำไฟฟ้าเชิงเส้นต่อรัศมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ไม่แอเนนนิลและนำไปแอนนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

Annealing Temperature (°C)	Decay Time (S)							
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term		4 th Term	
	I_1 (A)	σ_1 (cm ⁻²)	I_2 (A)	σ_2 (cm ⁻²)	I_3 (A)	σ_3 (cm ⁻²)	I_4 (A)	σ_4 (cm ⁻²)
As-deposited	1.15×10^1	2.224×10^{16}	3.62×10^{-4}	7.20×10^{16}	1.55×10^{-4}	7.97×10^{16}	1.82×10^{-4}	7.82×10^{16}
100	1.71×10^{-3}	5.79×10^{17}	1.57×10^{-4}	7.95×10^{17}	4.05×10^{-4}	7.09×10^{17}	1.11×10^{-3}	6.18×10^{17}
200	3.06×10^{-1}	1.71×10^{17}	1.18×10^{-3}	9.75×10^{17}	9.96×10^{-4}	1.00×10^{18}	1.02×10^{-3}	9.96×10^{17}
300	2.22×10^{-3}	2.36×10^{17}	3.81×10^{-4}	3.05×10^{17}	2.96×10^{-4}	3.14×10^{17}	2.74×10^{-4}	3.17×10^{17}
400	4.70×10^{32}	3.75×10^{17}	1.13×10^{-4}	4.53×10^{16}	6.38×10^{-6}	5.96×10^{16}	2.76×10^{-6}	6.38×10^{16}

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuS และ SnSe ในอัตราส่วน 2:1 พบว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ฟิล์มมีสีน้ำตาลผิวหน้ามีความราบเรียบสม่ำเสมอและมันวาวเมื่อนำมาแอนนัล ที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียสสีของฟิล์มจางลง ซึ่งสีของฟิล์มเกิดได้เมื่อให้พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ที่ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่านออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นสีของฟิล์มบางตามความยาวคลื่นที่ถูกส่งผ่านออกมา ฟิล์มมีคุณสมบัติในการยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดีสามารถเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน การทดลองแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าสารตั้งต้นบางชนิดระเหยไปจนหมดฟิล์มบนกระจกสไลด์มีสีขาวขุ่นจึงไม่สนใจในการนำมาศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์

5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนัลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการแอนนัล 60 นาที พบว่าฟิล์มบาง $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ที่ความเข้มสูงสุดของมุม 2θ ปรากฏระนาบ (202)/(130) โดดเด่นเมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสฟิล์มบางความเข้มของพีคจะลดลง จากการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมี

ขนาดลดลงและมีความละเอียดเพิ่มขึ้นแต่แอนนิลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขนาดของเกรนจะมีขนาดเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ไม่ผ่านการแอนนิลมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร ฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียสจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่น 600-820 นาโนเมตรเมื่อทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่ามีค่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2 ค่า แสดงว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มี 2 เฟสผสมกันอยู่โดยที่เฟส $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำประมาณ 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนเฟส $\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_2$ มีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงประมาณ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ พิจารณาในช่วงความยาวคลื่น 400-1400 นาโนเมตรในการหาค่าดัชนีหักเหทางแสงจะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$n = n_s \left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^{1/2}$$

พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรค่าดัชนีหักเหทางแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในช่วงความยาวคลื่น 700-1400 นาโนเมตรการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางตามความยาวคลื่นสอดคล้องกับสมการคอสี่ถึงความสัมพันธ์ $n = a + (b/\lambda^2)$ และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตรจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงความยาวคลื่น 500-700 นาโนเมตรหลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงความยาวคลื่น 1400 นาโนเมตร พบว่าค่าดัชนีหักเหทางแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนแบบแปรผันตรงกัน ค่าฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านเข้าไปในฟิล์มบางพลังงานของโฟตอนจะมีการสูญเสียขณะเดินทางเข้าไปในเนื้อสารโดยการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตรจะมีค่ามากกว่าการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางมีนัยสำคัญที่พลังงานโฟตอนสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน

แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะจำลองมาจากรูปแบบการสั่นของอิเล็กตรอน เนื่องจากมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้ามาในอีกผลึก อิเล็กตรอนจะสั่นไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้ารอบๆ ไอออนคอร์ (ion cores) ในรูปแบบที่มีทิศเดียวกัน พารามิเตอร์ทางแสงค่าต่างๆ ได้จากการทราบค่าดัชนีหักเหที่สัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นแสงดังสมการ

$$\frac{1}{n^2 - 1} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2$$

ค่า E_0 คือค่า พลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และ E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงานซึ่งค่า E_0 และ E_d จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จากกฎของโอห์มสภาพนำไฟฟ้าคืออัตราส่วนของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้า ขณะเดียวกันส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้าก็คือสภาพต้านทานซึ่งจากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามักอยู่ในช่วง 0.7-6.0 โอห์ม เซนติเมตร จากปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นของโฮลมีค่าในช่วง 10^{17} - 10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และพบว่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์ เมื่อเพิ่มขึ้นสารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวินของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ซึ่งเคลือบสารลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300-200 เคลวิน พลังงานกระตุ้น (E_g) ที่คำนวณได้จากกราฟ $\ln\sigma$ กับ $1000/T$ คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับผู้รับ (acceptor level) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในการเกิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้รับจะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour acceptors) โดยมีพลังงานความร้อนเป็นตัวกระตุ้นระดับพลังงานผู้รับก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซต อย่างแรง (highly compensated semiconductor) สามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,\text{NNH}} \exp\left(-\frac{E_{0,\text{NNH}}}{kT}\right)$$

จากการคำนวณพลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดและอุณหภูมิการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ค่าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากการนำฟิล์มมาทำการแอนนีส ในช่วงอุณหภูมิ 200-110 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นมีระยะไม่คงที่ดังความสัมพันธ์

$$\sigma T^{1/2} = \sigma_{0,\text{Mott}} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,\text{Mott}}}{T}\right)^{1/4}\right]$$

สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ขณะอุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 100-50 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพอส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right]$$

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ช่องว่างของคูลอมบ์ และระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด

การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S},\text{Se})_3$ ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสจากการศึกษาพบว่าเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยสามารถพิจารณาได้จากการใช้ฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าช่วงชีวิตหลายค่า เมื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของกักประจุพบว่ามีค่ามากที่สุด 1.00×10^{18} ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศด้วยอะซิโตนให้สะอาดก่อนและหลังใช้งานและควรปิดระบบไว้เพื่อไม่ให้ออกซิเจนมาจับภายในห้องสุญญากาศ
2. เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางเรียบร้อยแล้วควรศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์อย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของฟิล์มบาง
3. ควรเก็บฟิล์มให้มิดชิดในหม้อดูดความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้คุณสมบัติบางประการของฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม ไดซีลีไนด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2544. ผลการแอนนัลด้วยความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จูตินัย แก้วแดง., งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จูตินัย แก้วแดง., งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. ประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ญัฐพร พรหมรส. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี ออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสง อาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2555. ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์ม บางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ญัฐพร พรหมรส. 2555. การเตรียมและศึกษาสมบัติของ ฟิล์มบาง Cu_xS , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{WO}_3(0 \leq x \leq 0.05)$ และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิพจน์ CdS/CuO , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ ฐิตินัย แก้วแดง และ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2557. การศึกษาสมบัติรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ ฐิตินัย แก้วแดง และ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2557. การศึกษาสมบัติรอยต่ออวิวิพจน์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปคเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์ม บาง CuO โดยวิธีอีแอกทีฟดีซีสเปคเตอร์เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพจน์ CdS/CuO , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2559. กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ซีซึ่งเตรียมโดยวิธีอีแอกทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอร์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2560. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Bansal, S. Pandya, K.D. and Kashyap, C.S. 2012. "Charge Transport Mechanism in High Conductivity Undoped Tin Oxide Thin Films Deposited by Reactive Sputtering." *J. Thin Solid Films*. 524 : 30-34.

Burton, L.A. and Walsh, A. 2012. "Phase Stability at the Earth-Abundant Tin Sulfides SnS , SnS_2 , and Sn_2S_3 ." *J. Phys. Chem. C*. 116 : 24262-24267.

Cheng, S. and Conibeer, G. 2011. "Physical Properties of Very Thin SnS Films Deposited by Thermal Evaporation." *J. Thin Solid Films*. 520 : 837-841.

Chetri, P. and Choudhury, A. 2013. "Investigation of Optical Properties of SnO_2 Nanoparticles." *J. Physics E*. 47 : 257-263.

Choi, W.S. 2009. "The Fabrication of Tin Oxide Films by Atomic Layer Deposition Using Tetrakis (Ethylmethylamino) Tin Precursor." *J. Trans Electrical and Electronic Material*. 27 : 123-129.

Devika, M. Reddy, N.K. Patolsky, F. and Gunasekhar, K.R. 2008. "Ohmic Contacts to SnS Films: Selection and Estimation of Thermal Stability." *J. Appl.Phys*. 104 : 124503-1-124503-6.

Dhankhar, M. Singh, O.P. and Singh, V.N. 2014. "Physical Principles of Losses in Thin Film Solar Cells and Efficiency Enhancement Methods." *J. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 40 : 214-223.

Dias, S. Murali, B. and Krupanidhi, S.B. 2015. "Solution Processible Cu_2SnS_3 Thin Films for Cost Effective Photovoltaics: Characterization." *J. Materials Chemistry and Physics*. 167 : 309-314.

Gao, C. Shen, H. and Sun, L. 2011. "Preparation and Properties of Zincblende and Orthorombic SnS Films by Chemical Bath Deposition." *J. Appl.Surf.Sci*. 257 : 6750-6755.

Gao, C. Shen, H. Sun, L. and Shen, Z. 2011. "Chemical Bath Deposition of SnS Films With Different Crystal Structures." *J. Mater*. 65 : 1413-1415.

- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors." *J. Appl. Phys.* 97 : 143510-1- 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction." *J. App. Phys.* 90 : 2431061-243106-3.
- Green, M.A. Emery, K. Hishikawa, Y. Warta, W. and Dunlop, E.D. 2015. "Solar Cell Efficiency Tables (Version 45)." *J. Prog. Photovolt. Res. Appl.* 23(1) : 1-9.
- Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors." *J. Appl.Phys.* 87 : 243512-1- 243512-3.
- Guo, L. Wang, X. Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers." *J. Appl.Phys.* 102 : 072103-1-072103-3.
- Hadi, Z.L. and Chiad, B.T. 2019. "Investigation of Laser Grooving Process on Copper Tin Sulfite Thin Films" *J. Physics.* 1178 : 1-8.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. "Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors." *J. Appl. Phys.* 99 : 113301-1-113301-3.
- Kanai, A. Tayonago, K. Chino, K. Katagiri, H. and Araki, H. 2015. "Fabricatoin of Cu₂SnS₃ Thin-Film Solar Cells With Power Conversion Efficiency of Over 4%." *J. Applied Physics.* 54 : 08KC06-1-08KC06-4.
- Lokhande, A.C. Chalapathy, R.B.V. He, M.R. Jo, E.J. Gang, M.G. Pawer, S.A. Lokhande and C.D. Kim, J.H. 2016. "Development of Cu₂SnS₃ (CTS) Thin Film Solar Cells By Physicl Techniques : A Status Review." *J. Solar Energy Materials and Solar Cells.* 153 : 84-107.
- Majumder, S. 2009. "Synthesis and Characterisation of SnO₂ Films Obtained by a Wet Chemical Process." *J. Mater Sci-Poland.* 27 : 123-129.
- Serin, N. Yildiz, A. Alsac, A.A. and Serin, T. 2011. "Estimation of Compensation Ratio by Identifying The Presence of Different Hopping Conduction Mechanisms in SnO₂ Thin Films." *J. Thin Solid Films.* 519 : 2302-2307.

- Tiwari, D. Chaudhuri, T.K. Shripathi, T. and Deshpande, U. 2014. "Synthesis of Earth-Abundant Cu_2SnS_3 Powder Using Solid State Reaction." *J. Physics and Chemistry of Solids*. 75 : 410-415.
- Vantran, T. Turrell, S. Eddafi, M. Capoen, B. Bouzaoui, M. Roussel, P. Berneschi, S. Righini, M. Ferrari, M. Bhaktha, S.N.B. Cristini, O. and Kinowski, C. 2010. "Investigations of the effects of the growth of SnO_2 nanoparticles on the structural properties of glass-ceramic planar waveguides using Raman and FTIR spectroscopies." *J. Mol. Struct.* 976 : 314-319.
- Yazdani, A. Shadrokh, Z. Hussein, H.M. 2018. "The effect of Polyvinylpyrrolidone (PVP) on Thermochemical Reaction of Cu_2SnS_3 Nanoparticles: Shape and Opto-Crystalline Structure." *J. Materials Science in Semiconductor Processing*. 79 : 127-134.
- Yildirim, A.M. 2012. "The Effect of Copper Concentration on structural, Optical and Dielectric Properties of $\text{Cu}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ Thin Films." *J. Optics Communication*. 285 : 1215-1220.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Cu_2SnS_3 ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.27-198

Pattern : 27-198			Resolution = 1.540800	Quality : Indexed			
Cu_2SnS_3			2θ	I	h	k	l
Copper Tin Sulfide			16.162	30	0	-2	1
			18.582	10	-1	-1	3
			20.906	20	-1	-2	2
			24.435	5	-1	-1	6
			28.401	100	0	-1	0
			30.983	10	0	-1	4
			31.985	10	-1	-1	5
			32.633	5	0	0	2
			32.902	60	0	0	6
			34.210	10	0	0	5
			36.775	10	0	0	2
			38.289	10	0	0	7
			41.898	30	-1	1	7
			42.587	10	0	1	8
			43.962	10	-1	-1	9
			46.080	10	-1	0	1
			47.254	100	0	0	10
			48.198	10	0	-2	1
			50.978	5	-1	-1	9
			54.080	10	-1	-1	10
			58.086	60	0	0	8
			58.868	20	2	2	0
			59.942	10	3	3	0
			69.857	30	-1	0	12
			71.403	10	-3	3	3
			74.879	10	0	5	12
			78.445	30	0	0	8
			78.880	10	0	7	9
<p>FOOTNOTE FOR D-SPACINGS AND INTENSITIES : 1 Substructure reflections.</p> <p>SAMPLE PREPARATION : Synthesized from the elements or from Cu_2S and SnS_2 at 700 C.</p> <p>ADDITIONAL PATTERN : To replace 10-412.</p> <p>UNIT CELL DATA : Pattern can also be indexed in a primitive monoclinic pseudo cell with $a=18.76$, $b=11.51$, $c=6.54$, $\beta=90.23$.</p>							
<p>*Neuse Jahrb. Mineral., Monatsh., page 424, (1974) primary reference : Wang, N.</p>							
Resolution : $\text{CuK}\alpha$	Filter : Not specified						
Lambda : 1.54180	d-sp : Not given						
ICDD Ref : F29-1(0.8980,940)	Internal standard : SiO_2						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

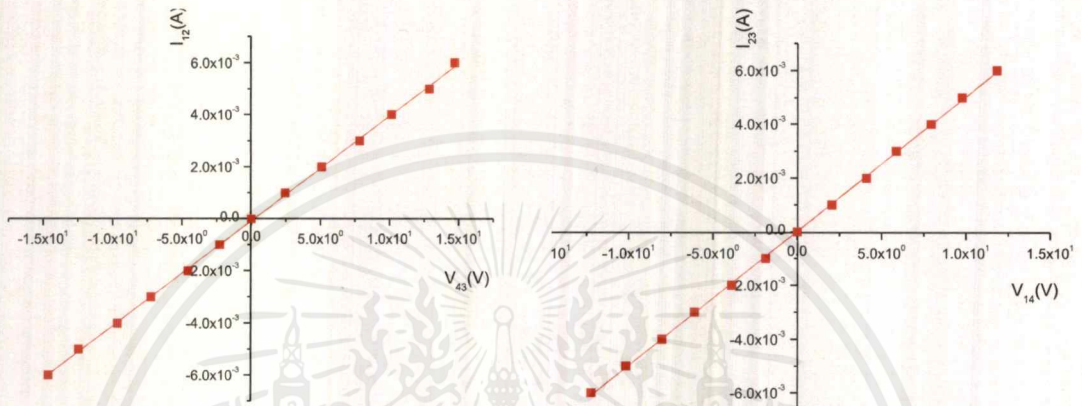
ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Se
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.83-2437

Pattern : 83-2437		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Se		2 θ	I	h	k	l
Selenium		25.361	32	1	0	0
		31.033	100	1	0	1
		44.225	32	0	1	2
		44.693	16	1	1	0
		48.384	15	1	1	1
		52.083	2	2	0	0
		54.606	6	0	0	3
		55.406	15	2	0	1
		58.408	7	1	1	2
		61.130	3	1	0	3
		64.692	8	0	2	2
		71.010	8	2	1	0
		73.137	5	1	1	3
		73.821	4	1	2	1
		78.831	1	0	2	3
		81.052	3	1	0	4
		82.046	3	2	1	2
		85.073	3	0	3	1
Lattice : Hexagonal S.G. : P3121 (152) a = 4.05200 c = 5.03800 Z = 3		Mol. weight = 78.96 Volume [CD] = 71.64 Dx = 5.491 I/cor = 8.01				
ICSD COLLECTION CODE : 200685 REMARKS FROM ICSD : REM PRE 2580. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 16, page 4404, (1977) ; Keller, R., Holzapfel, W.B., Schulz, H.						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

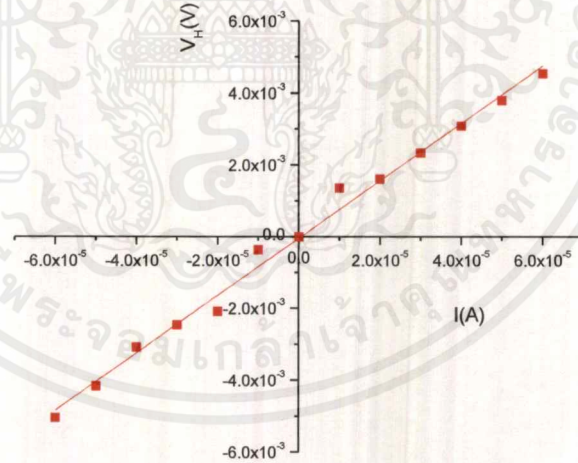
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

1. ตัวอย่างวิธีการคำนวณหา NNH, Mott-VRS และ ES-VRS จากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนیلที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
จากกราฟ



แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) และ (R_2) ตามลำดับ ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I)

จะได้

$$\text{slop} = \frac{1}{R}$$

$$R_1 = \frac{1}{0.4034 \times 10^{-3}} = 2.478 \times 10^3$$

$$R_2 = \frac{1}{0.5010 \times 10^{-3}} = 1.996 \times 10^3$$

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

$$= 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{2.478 \times 10^3 - 1.996 \times 10^3}{2.478 \times 10^3 + 1.996 \times 10^3} \right)^2$$

$$= 0.9957$$

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) = 0.9957 \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{2478 + 1996}{2} \right)$$

$$= 1.009 \times 10^4$$

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

$$= (1.009 \times 10^4) (5 \times 10^{-5})$$

$$= 0.5047$$

จากราพระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) จะได้

$$\text{slope} = \frac{V_H}{I} = 7.9 \times 10^{-2}$$

$$R_H = 10^8 \left(\frac{V_H}{I} \right) \frac{d}{B} = 10^6 (0.079 \times 10^2) \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right) = 8.587 \text{ cm}^{-3} / c$$

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} = \frac{0.857}{0.50} = 1.72 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$$

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(0.857)} = 7.29 \times 10^{18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างวิธีการคำนวณหา NNH, Mott-VRS และ ES-VRS จากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Nearest Neighbour Donors ช่วงอุณหภูมิ เคลวิน 300-220

$$y = mx + c ; y = -0.761x - 729.2$$

$$\text{จาก } c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$$

$$\sigma_{0,NNH} = e^{2.729} = 15.31 \text{ s / cm}$$

$$E_{NNH} = \frac{-1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.761)}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.065 \text{ eV}$$

$$N_d = \left(\frac{0.065(1.6 \times 10^{-19})(4\pi)(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right)^3 = 4.14 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_{CI} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.14 \times 10^{19})^{2/3} (6.626 \times 10^{-8})}{4\pi(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})(1.38 \times 10^{-23})} = 176.18 \text{ K}$$

ES-VRH ช่วงอุณหภูมิ 40-100 เคลวิน

$$y = mx + c ; y = -16.79x - 4.7759$$

$$\text{จาก } c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$$

$$\sigma_{0,ES} = e^{4.7759} = 1.1862 \times 10^2 \text{ s / cm}$$

$$T_{0,ES} = (-16.79)^2 = 2.819 \times 10^2 \text{ K}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(2.819 \times 10^2)(7.5076)(8.85 \times 10^{-14})} = 2.77 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} = \frac{1}{4} \left(\frac{2.819 \times 10^2}{100} \right)^{1/2} = 0.4197$$

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} = \frac{1}{2} (1.38 \times 10^{-23})(100) \left(\frac{2.819 \times 10^2}{100} \right)^{1/2} = 7.24 \times 10^{-3} \text{ eV}$$

$$T_{C2} = \frac{16T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} = \frac{16(2.819 \times 10^2)^2}{1.984 \times 10^5} = 6.40 \text{ K}$$

$$\Delta C = \frac{k_B}{q} \left(\frac{T_{0,ES}^3}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{(2.819 \times 10^2)^3}{2.819 \times 10^5} \right)^{1/2} = 9.17 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

Mott-VRH ช่วงอุณหภูมิ เคลวิน 210-125

$$y = mx + c ; y = -21.1062 + 7.37499$$

$$\text{จาก } c = \ln \sigma_0 \longrightarrow \sigma_0 = e^c$$

$$\sigma_0 = e^{7.37499} = 1.60 \times 10^3 \text{ s/cm}$$

$$T_0 = (-21.1062)^4 = 1.98 \times 10^5 \text{ K}$$

$$T_0 = \frac{18 \alpha^3}{\frac{k}{q} N_{0(E_F)}} ; \alpha = 1.24 \times 10^7 \text{ cm}^{-1} ; \alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{1/2} = 1.509 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$$

$$N_{0(E_F)} = \frac{18 \alpha^3}{\frac{k}{q} T_0} = \frac{18 (1.509 \times 10^7)^3}{\left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (1.98 \times 10^5)} = 3.613 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$$

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1.509 \times 10^7} = 6.626 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9}{8\pi \alpha \frac{k}{q} T N_{0(E_F)}} \right)^{1/4} = \left(\frac{9}{8\pi (1.509 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (210) (3.613 \times 10^{21})} \right)^{1/4}$$

$$= 1.379 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

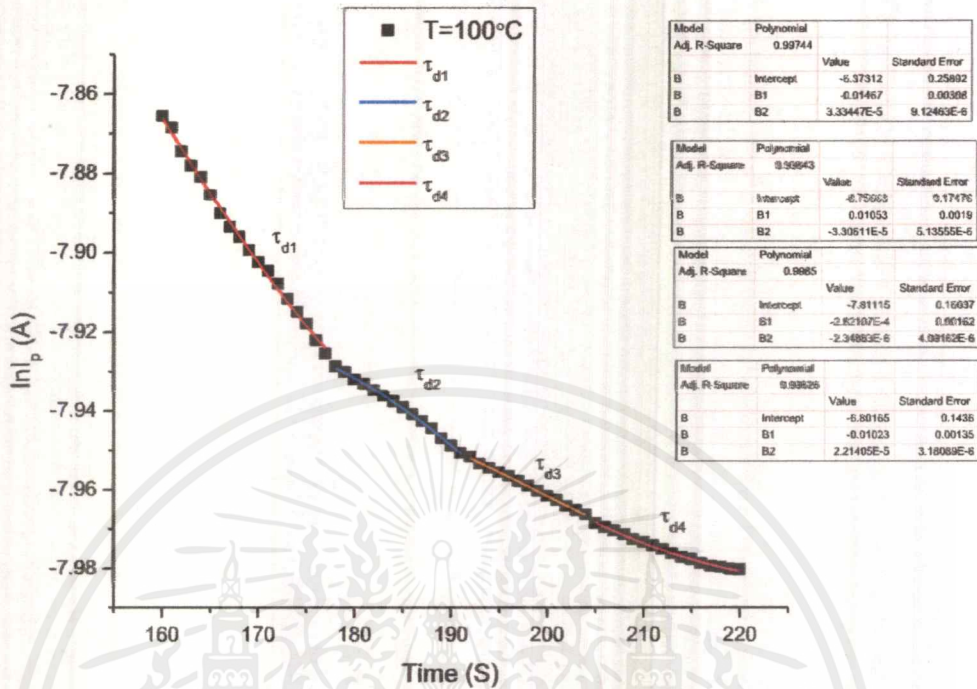
$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{1.3799 \times 10^{-7}}{6.62691 \times 10^{-8}} = 2.082$$

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_{0(E_F)}} = \frac{3}{4\pi (1.3799 \times 10^{-7})^3 (3.61361 \times 10^{21})} = 2.514 \times 10^{-2} \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักประจุจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากกราฟ



จะได้

$$\sigma_x = \frac{\ln I_p}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

$$\sigma_l = \frac{-6.3731}{(1.6 \times 10^{-19})(17.2)(20)} \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$\sigma_l = 2.224 \times 10^{16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้