

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิด
สารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
CHARACTERIZATION OF $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS FABRICATED
BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD IN VACUUM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS FABRICATED
BY CLOSE SPACED SUBLIMATION METHOD IN VACUUM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTE 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

Characterization of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ Thin Films Fabricated by Close Spaced Sublimation Method in Vacuum

ชื่อนักศึกษา นางสาวปาริชาติ คำหมอน รหัสนักศึกษา 57050996
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารจ บัณฑิตาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภู่อภิเกียรติ กรรมการ	
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี ในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปาริชาติ คำหมอน รหัสนักศึกษา 57050996
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบลงแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และองค์ประกอบของฟิล์มบางโดยวิธี XRD SEM และ EDS ตามลำดับ เมื่อปริมาณของ Se เพิ่มขึ้นช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงจะมีค่าลดลงจาก 1.18 เป็น 0.95 อิเล็กตรอนโวลต์ สมบัติทางไฟฟ้าสามารถศึกษาได้โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์และสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ในช่วงอุณหภูมิ 225 ถึง 285 เคลวิน สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิในช่วง 80 ถึง 190 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ส่วนสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองกลไกการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอฟสกี จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ กระแสที่ลดลงตามเวลาสามารถพิตกราฟได้ด้วยฟังก์ชันมัลติ-เอ็กซ์โพเนนเชียล ส่งผลให้ได้ช่วงชีวิตคอนข้างยาวจำนวนหลายค่า อีกทั้งยังคำนวณความหนาแน่นของกักตักพาหะได้จากกระแสชาลงนี้

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Characterization of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ Thin Films Fabricated by Close Spaced Sublimation Method in Vacuum
Students	Miss. Parichat Cummon Student ID 5750996
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang

Abstract

In this special project, $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) thin films were prepared on slide glass substrate by close spaced sublimation method. Structural, morphological and compositional features were investigated by XRD, SEM and EDS, respectively. As the Se content increases, the direct band gap of $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films determined from the transmission spectra varies from 1.18 eV (for SnS thin films) to 0.95 eV (for SnSe thin films). Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. The temperature dependence of electrical conductivity in $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) thin films between 225 and 285 K was interpreted in terms of NNH model. The conductivity at temperature between 80 – 190 K was described by Mott – VRH model. The conductivity at low temperature (< 80 K) is well described by ES – VRH model. From transient photoconductivity measurement, the decay current data are better fitted with multi-exponential function resulting in the several slow decay times. Density of trap states were also observed from the decay current.

Keywords : $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films, Close spaced sublimation method, Optical properties
Electrical properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และอาจารย์ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา และให้ความรู้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน และคอยช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นางสาวจรรุวรรณ มีนาง นางสาวกัญญ์ณิษฐ์ จันท์ครบ และนายมนตรี หาญโย นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ปาริชาติ คำหมอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	7
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	7
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก	10
2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทึบซัลไฟด์	12
2.1.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทึบซีลีไนท์	13
2.1.5 ข้อบกพร่องผลึก	14
2.1.5.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	14
2.1.5.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	15
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	16
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	19
2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	22
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	24
2.4.5 พูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	26
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	28
2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	28
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	29
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก	31
2.6 สภาพนำไฟฟ้า	35
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	36
2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	36
2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	38
2.8 ปรากฏการณ์ฮอลล์	39
2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	44
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	47
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	48
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง	50
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	53
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวอื่น	55
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง	63
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น	64
2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	65
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	67
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	71
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	71
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้ เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	71
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	72
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	72
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	73
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	73
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	74
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74
3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	75
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	78
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	80
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	80
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	80
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	80
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	80
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว	81
3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	81
3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	86
4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	86
4.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	88
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	90
4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	90
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	94
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	96
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	99
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	105
4.5.1 ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	105
4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	111
4.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	118
4.5.4 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	131
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	136
5.1 สรุปผลการวิจัย	136
5.2 ข้อเสนอแนะ	138

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	11
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	77
4.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	91
4.2 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	96
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	98
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	104
4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $SnS_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	117
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณจากแบบจำลองของซีโตของสารกึ่งตัวนำ $SnS_{1-x}Se_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที	124
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอดต์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที	128
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรสซอลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 10 นาที	130
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงตัวขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	11
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกทึนซิลไฟต์	13
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกทึนซิลีไนท์	13
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	15
2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	15
2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	16
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	17
2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย	19
2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน	21
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน	21
2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	22
2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน	24
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	26
2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	27
2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	27
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	32
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	37
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	41
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่น	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 บางที่มีรูปทรงใดๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H)กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	46
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน	48
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน	52
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$	52
2.28 แสดงระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะชนิดจ็อบิเล็กตรอน (E_{je}) และกัณฑ์พาหะชนิดจ็อบโฮล (E_{jh}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	56
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान	59
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान ทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง	60
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง	63
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น	64
2.33 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 และ 300 องศาเซลเซียส	68
2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 และ 300 องศาเซลเซียส	69
2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 และ 300 องศาเซลเซียส	69
2.36 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส(ก.) และ 300 องศาเซลเซียส(ข.) ตามลำดับ	70
3.1 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP	73
3.3 เครื่องยูวี-วีไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750	73
3.4 แสดงผลึกของสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลอง ทั้งแบบที่ปิดแฟลช และ เปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ	77
3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	79
3.6 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	79
3.7 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	81
3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	82
3.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	83
3.10 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	84
3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	85
4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	87
4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	88
4.3 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	89
4.4 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงที่ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	90
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โคจรผลึก a, b และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	93
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	95
4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	97
4.9 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	99
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hν) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ X=0.0	100
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hν) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ X=0.2	100
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hν) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ X=0.4	101
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hν) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ X=0.6	101

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ $X=0.8$	102
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ $X=1.0$	102
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (Indirec)	103
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ X เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0	103
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	104
4.19 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	105
4.20 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	105
4.21 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	106
4.22 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	107
4.24 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	107
4.25 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	108
4.26 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	108
4.27 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	109
4.28 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	109
4.29 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	110
4.30 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	110
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)	111
4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	112
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)	112
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	113
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)	113
4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	114
4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)	114
4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	115
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{2d}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	116
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)	116
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	117
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ T^{-2} ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	118
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	131
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	133
4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มอลไฮซ์خالง กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องทะนุบำรุงมาก สามารถติดตั้งร่วมกับอาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบหลักที่ใช้ยังมีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

งานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe_2 โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 16.5 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Green et al. 2015; Jackson et al. 2011) แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ In และ Ga ล้วนเป็นธาตุที่หายาก มีราคาแพง ส่วนธาตุ Cd เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอระวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีการวิจัยเพื่อค้นคว้าหาวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่าเดิม

สารกึ่งตัวนำ SnS เป็นหนึ่งในสารประกอบซัลโคไลน์ที่มีความโดดเด่นเช่นเดียวกับ CdTe และ CuInGaSe_2 เนื่องจากธาตุดีบุกและซัลเฟอร์หาได้ง่าย มีมากในธรรมชาติ ราคาไม่แพง สารประกอบ SnS มีเสถียรภาพสูง โครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งขนาดของช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ชอคเลย์และควอยสเซอร์ (Shockley-Queisser) ได้ทำนายไว้ว่าสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ (Dhankhar et al., 2014) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe_2 (Cheng and Conibeer, 2011) และมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพเฟสระหว่าง Sn-S (Bletskan, 2005) สามารถเกิดสารประกอบที่เสถียรได้ 3 แบบคือ SnS, SnS₂ และ Sn₂S₃ สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก มีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น Pnma ไอออน Sn²⁺ จะสร้างพันธะกับไอออน S²⁻ จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5s² ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออน Sn²⁺ กับไอออน S²⁻ จะมีรูปร่างเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) อะตอมของ Sn กับอะตอมของ S จะสร้างพันธะต่อเนื่องกันกลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ส่วนกลุ่มปริภูมิอื่นๆ ของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ Fm3m, Cmc และ F43m จะสัมพันธ์กับเฟสรีดอกซ์ออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงเกิลต์ตามลำดับ (Devika et al., 2008)

ในทำนองเดียวกัน สารกึ่งตัวนำ SnSe ก็มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ช่องว่างแถบพลังงานมีทั้งแบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) มีค่าประมาณ 1.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นเราสามารถที่จะปรับแต่งสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_{1-x}Se_x ได้โดยการปรับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของสารละลายของแข็งของสารประกอบ SnS_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1)

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นหลากหลายรูปแบบ เช่น CdS/SnS, ZnS/SnS, ZnO/SnS, SnS₂/SnS, TiO₂/SnS, SnS/Si เป็นต้น (Xu and Yang, 2014) ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ZnO/SnS เท่ากับ 4.63 % (Sinsermsuksakul et al. 2014) แต่จากการจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ชั้นเดียว (single heterojunction) ของฟิล์มบาง ZnO/SnS, CdS/SnS และ Si/SnS สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 17.03, 16.26 และ 14.30% ตามลำดับ (Reddy et al., 2015) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโอกาสของการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ SnS นี้ยังสามารถที่จะวิจัยและพัฒนาต่อไปได้อีกมาก

การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถเตรียมได้จากหลากหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) วิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง วิธีซัลเฟอโรเซชันจากฟิล์มบางดีบุก และวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด (Shi et al., 2013; Yanuar et al., 2000) เป็นต้น

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศมีข้อดีหลายประการคือ อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางไม่มีความซับซ้อนมากนัก สามารถประกอบและติดตั้งขึ้นมาใช้เองได้ ใช้ระดับสุญญากาศไม่ต่ำนัก ดังนั้นต้นทุนค่อนข้างต่ำ เวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอญาดเห็นาไปเซประยชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ้น เป็นการประหยัดเวลา พิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางไม่สูงนัก ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ให้เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส จากนั้นจะทำการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ศึกษาสมบัติทางแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาร์ อีกทั้งยังทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักพาหะซึ่งเป็นผลมาจากข้อบกพร่องผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ SnS, SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99,999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 2) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
- 3) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
- 4) เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 5) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิต่ำในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) เพื่อศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต้อรันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการฉายแสงตก $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) กระทบแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่ง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
- 2) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกสารประกอบ SnS , SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)
- 4) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
- 5) ศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 6) ศึกษาทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
- 7) ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต้อรันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการฉายแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 8) สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน

1.4.1 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
- 2) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $(0 \leq x \leq 1)$ โดยที่มีค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม $(x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 4) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 5) ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 6) ศึกษาทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง ทั้งในขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง
- 7) สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS , SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
3. มีความรู้ความเข้าใจสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

$\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) รวมถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เตรียมได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

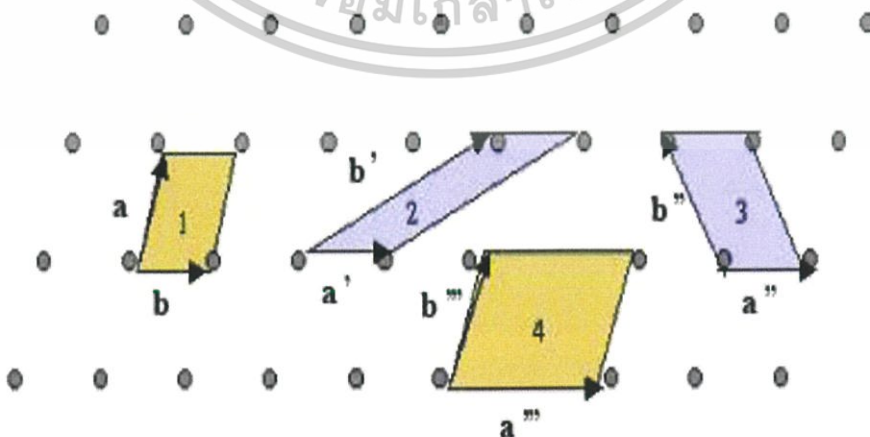
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

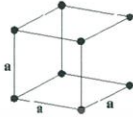
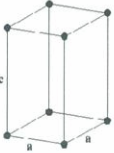


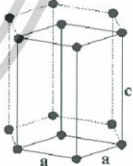
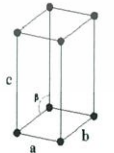
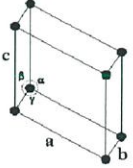
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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 \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α, β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็น (triclinic) วนไว้สำหรับการใช้งานที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

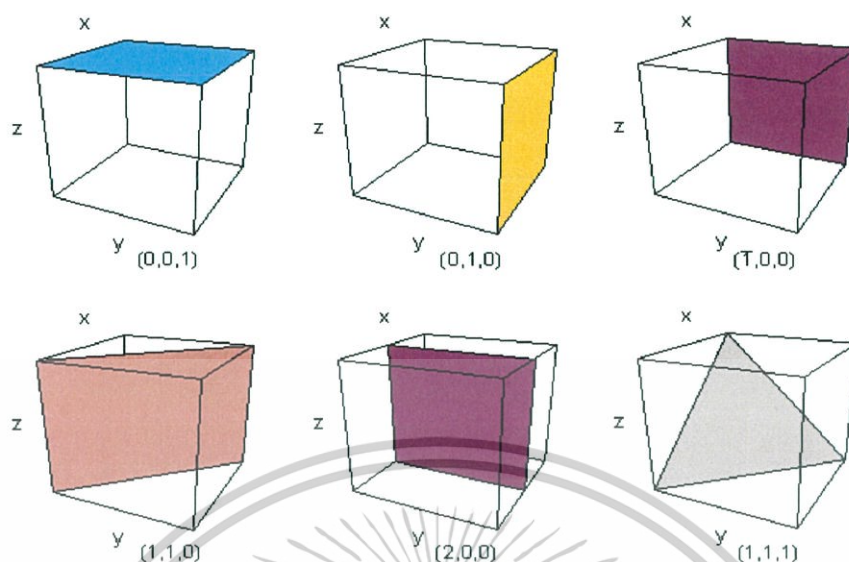
หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

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

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเอกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มี
 เอกสารที่กล่าวว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ l) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ราค่า
 ไม่ดังนี้ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = -(\mathbf{h} + \mathbf{k}) \quad (2.1)$$

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

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

2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทินซัลไฟด์ (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546;

งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Kittel, 1975; สุกฤษฏ์, 2547;

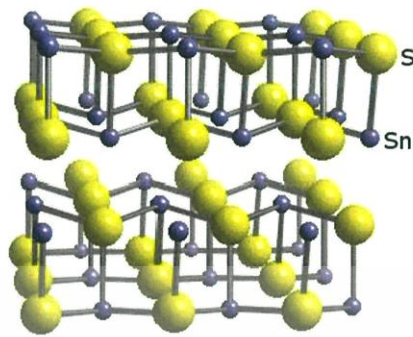
สมเกียรติ, 2542)

สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรอมบิกมีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น $pnma$ ไอออนของธาตุ Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน $5s^2$ ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออนของธาตุ Sn^{2+} กับไอออนของธาตุ S^{2-} จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์จะแสดงดังตารางที่ 2.4 อะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S จะสร้างพันธะต่อกันหนึ่งพันธะกลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 เฟสอื่นๆของสารประกอบ SnS ที่เกิดขึ้นได้อีก เช่น เฟสร็อคซอลต์ (rocksalts) เฟสออร์โธโรอมบิกที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ เป็นต้น

โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS จะแสดงดังรูปที่ 2.3 สารประกอบ SnS_2 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไอออนของธาตุ Sn^{4+} แต่ละไอออนจะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีชั้นบางๆ ของสารประกอบ SnS_2 จำนวน 3 ชั้น การจัดเรียงอะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้หลากหลาย (polytype) เช่น มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนัล และมีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ $Pnma$ ไอออนของธาตุ Sn^{4+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล แต่ละออกตะฮีดรัล จะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของสารประกอบ Sn_2S_3 โดยไอออนของธาตุ Sn^{4+} จะอยู่ในแกนกลางของสายโซ่ส่วนไอออนของธาตุ Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S^{2-} จำนวน 6 ไอออน แต่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบไตรโกนัลปิรามิด (trigonal-pyramidal geometry) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษคือมีรูปร่างเป็น

แบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยมสองรูปที่เอายอดปลายแหลมเชื่อมต่อกัน ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ SnS ที่ได้จากคาร์ทลอส ส่วนกลุ่มปริภูมิของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ ใช้

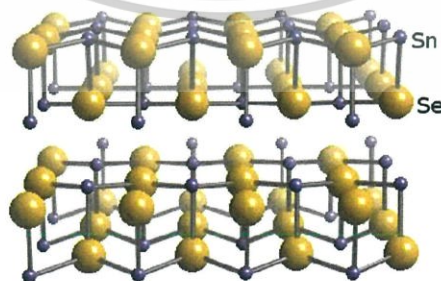
Pnma, Fm3m, Cmcm, F43m จะสัมพันธ์กับเฟสออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิต่ำ ,รีอคซอลต์, ออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของผลึกทินซีลไฟต์

ทินซีลไฟต์ หรือที่เรียกว่า สแตนนัส ซีลีไนด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตร SnSe ซึ่งดีบุกมีสถานะออกซิเดชัน +2 SnSe เป็นสารกึ่งตัวนำ (IV-VI) ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าต่ำจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการใช้งานด้านสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำและสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ SnSe มีการนำความร้อนต่ำและมีการนำไฟฟ้าที่ดีจึงเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

สารประกอบ SnSe มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก เช่นเดียวกับ SnS รัศมีของไอออน S^{2-} ($r = 1.98 \text{ \AA}$) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของไอออน Sn^{2+} ($r = 1.84 \text{ \AA}$) ดังนั้นค่าคงที่โครงสร้างผลึกของ SnSe จึงใหญ่กว่าของ SnS สารละลายของแข็งของสารประกอบ $Sn_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทุกค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกทินซีลีไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

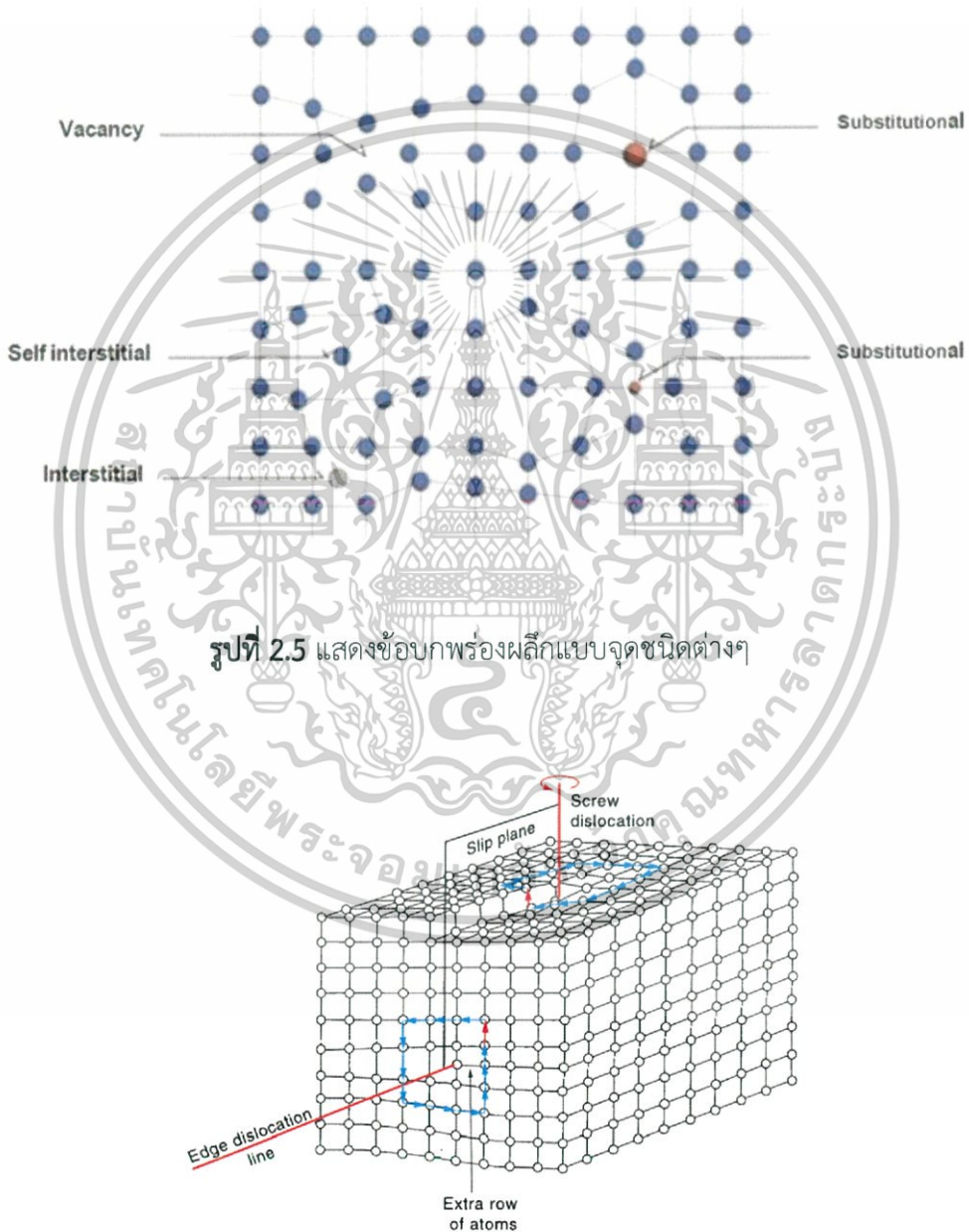
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

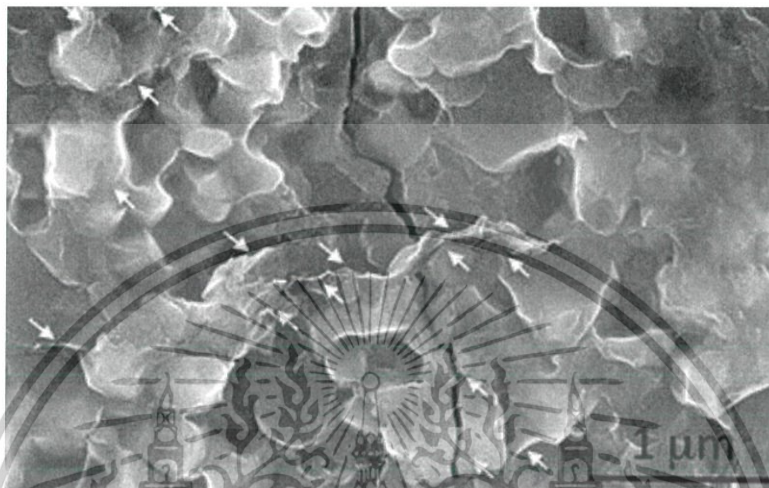
ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงสร้างผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

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

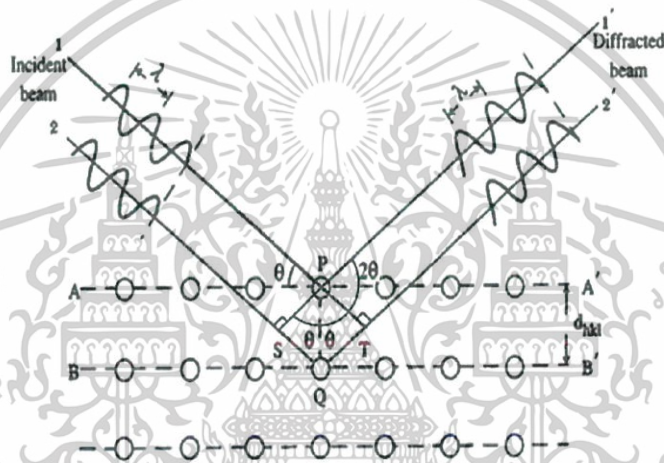
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ (2.2)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



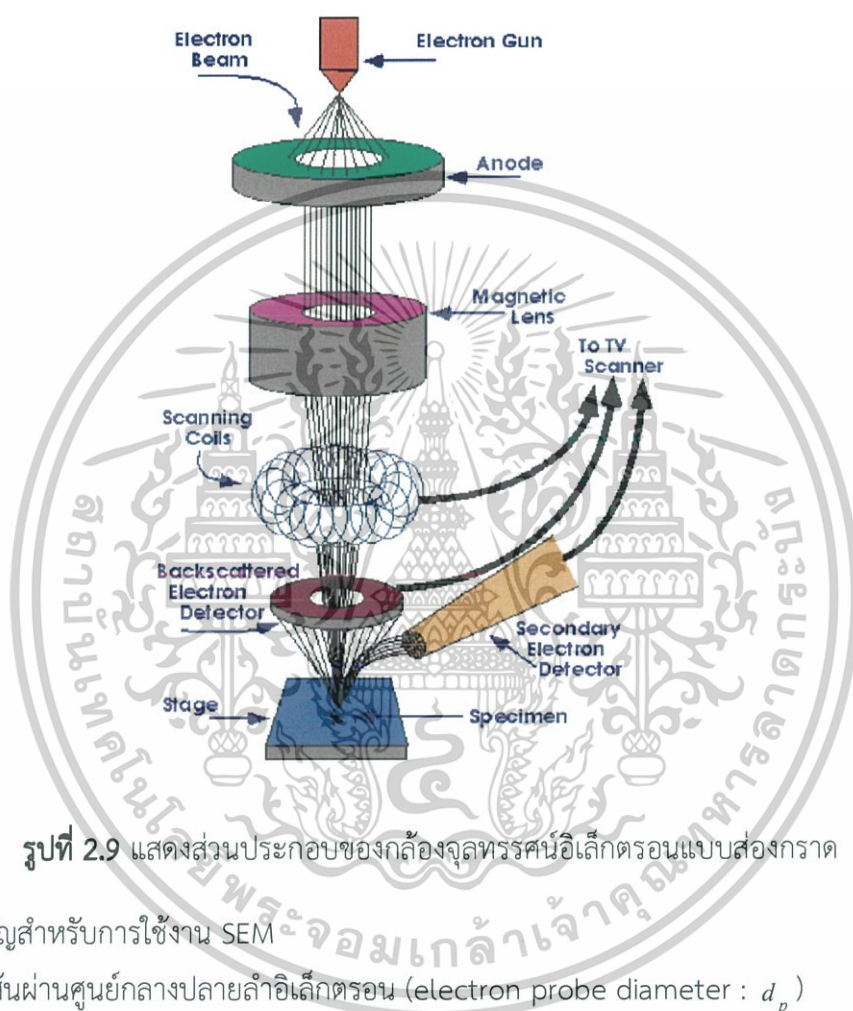
รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งาม นิตย, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดย เครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียมแอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อดังstrom ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section ผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผกผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

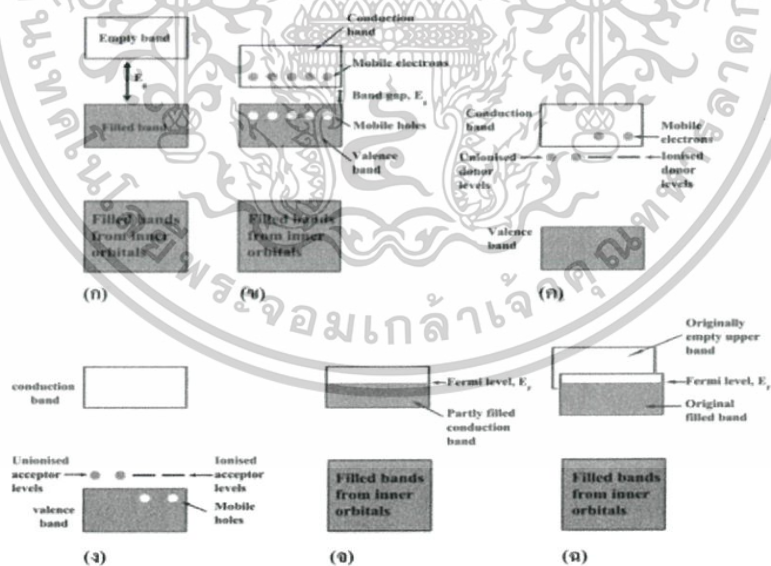
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

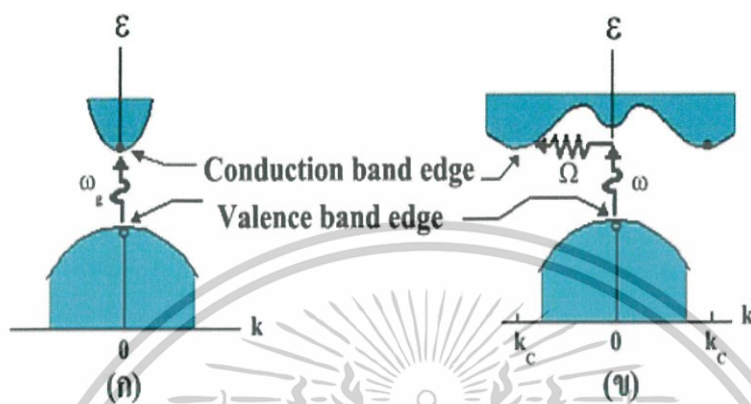
- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- ค. โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์เท่านั้น, โลหะ... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิได้... สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น... สารกึ่งโลหะ... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

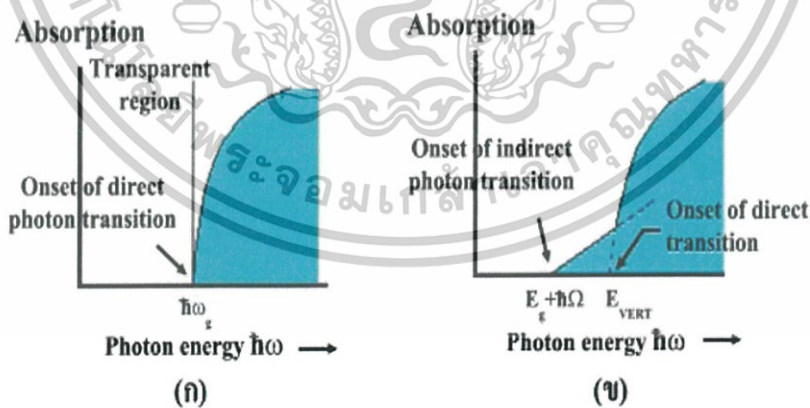
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่า $E_g \gg kt$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เรา จะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ จะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.9 (จ) และเรารู้ได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g - h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

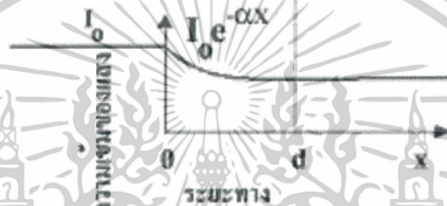
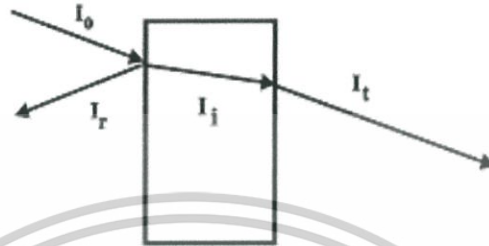


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.3}$$

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ $I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R)I_0$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการใช้ (2.4) ใช้

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

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

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

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

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

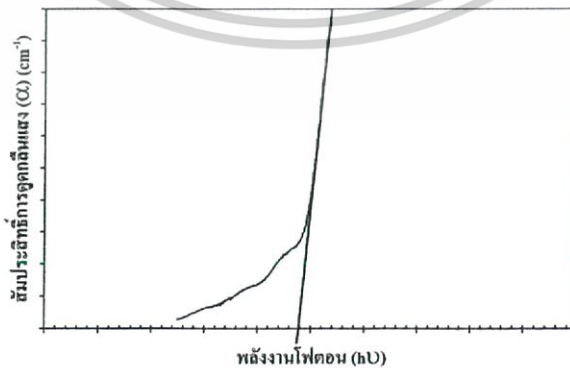
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

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

$$T = e^{-\alpha d} \tag{2.10}$$

จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

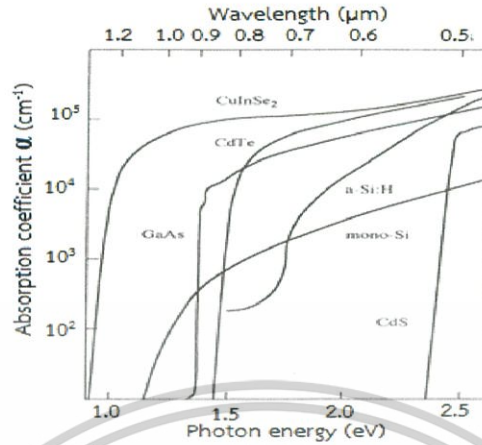
$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \tag{2.13}$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนจากเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยวิธีใด และ A, B และ C คือ ค่าคงที่ที่หาค่าได้จากข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.4.5 พูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

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

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

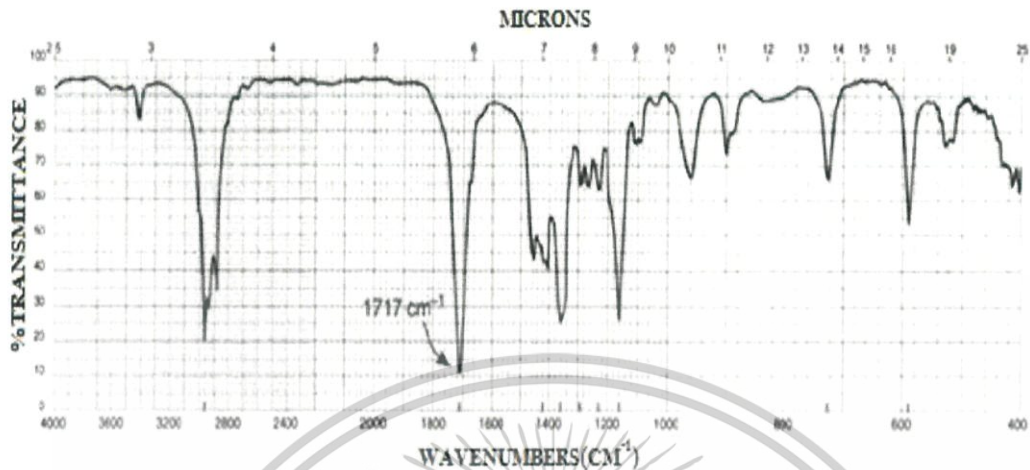
สเปกตรัมอินฟราเรด เป็นการพล็อตระหว่างค่าความถี่ (เลขคลื่น, ต่อเซนติเมตร) หรือความยาวคลื่น (ไมโครเมตร) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) (รูปที่ 2.16) นิยามของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านฟิล์มบางของสารตัวอย่างกับความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่เมื่อรณิได้ T ที่คืออัน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง หาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง

I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง



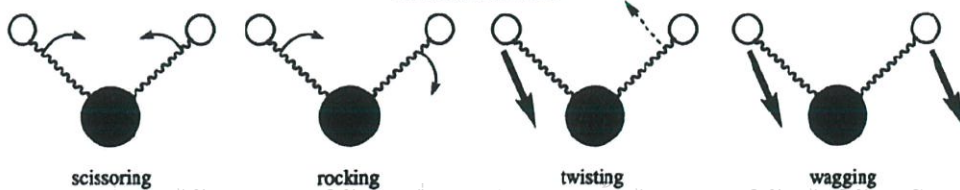
รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

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

STRETCHING MODES



BENDING MODES



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แถบพลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบพลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แถบพลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้ง อาจมีแถบพลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้ เรียกว่า แถบพลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แถบพลังงานรวม เกิดใกล้กับ แถบพลังงานพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแถบพลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ โอเวอร์โทน หรือแถบพลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอร์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีคทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า เฟอร์มิดับเบิล (Fermi doublet) รูปที่ 2.17 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH₂

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

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.18)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

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

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

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

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

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

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

นอกจากสมการที่ (2.20) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือจะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ $\int N_c(E)f(E)dE$ ซึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.21) จึงสามารถขยายของเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ได้เป็น

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

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

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

เมื่อ

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

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

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

โดย

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

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คือ มวลของผลของโฮลในแถบวาเลนซ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

และ

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

หรือ

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

จากสมการที่ (2.28) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

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

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

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = N_v \exp \left[- \frac{E_v + E_g}{kT} \right] \tag{2.31}$$

จะได้กฎการคงตัวของมวลดั่งสมการ

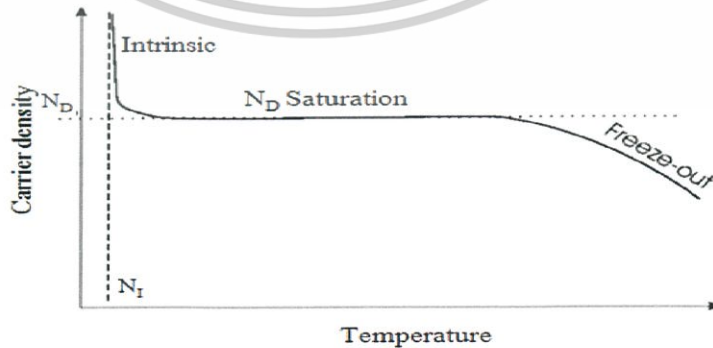
$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp \left[- \frac{E_g}{kT} \right] \tag{2.32}$$

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

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \tag{2.33}$$

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

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ

ชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.33) ลดรูปได้เป็น

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

จากสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.38)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

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

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

และ

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

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

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

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

เมื่อ

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

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

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

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N_c' จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.43) เทอมที่สองด้านขวามือได้ เราสามารถเขียนอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้ว่า

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

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

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

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

หรือ

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

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

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

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

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

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

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

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

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

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

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

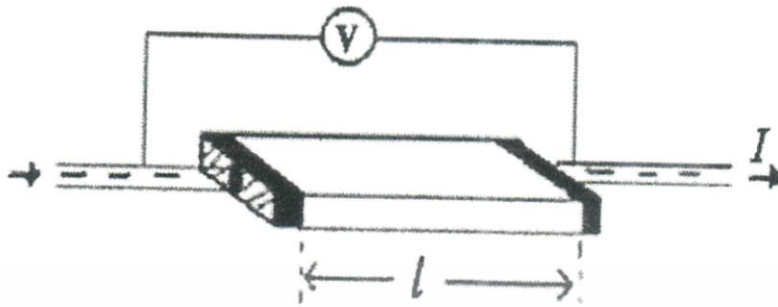
วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและ

ศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R ไม่เท่ากับ R ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

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

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

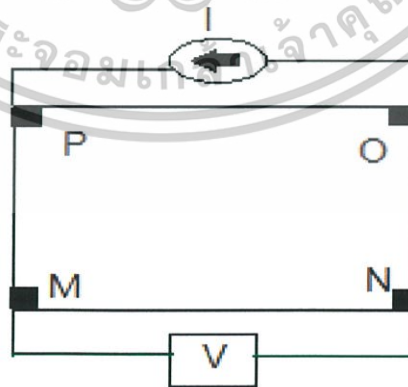
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยข้อสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างข้อสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค

แวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.53)

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

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

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

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

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

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

2.8 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิธย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

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

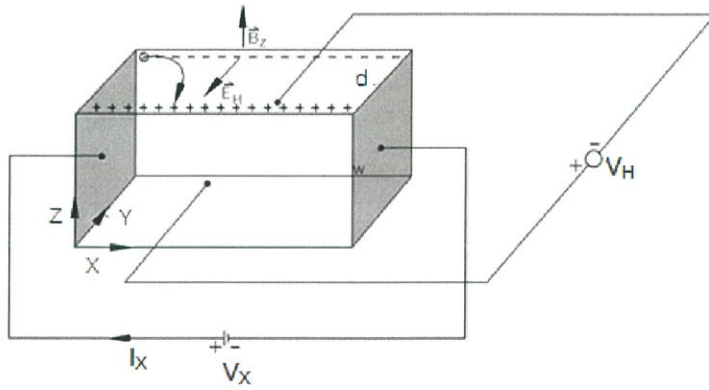
นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

จาก
$$I = nqvA \quad (2.63)$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.64)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.65)$$

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.70)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.70) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

เมื่อ

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

แล้ว

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

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดออกการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

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

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

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามเอกสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากไม่ตั้งนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์ข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้งานได้โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

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

หรือจากสมการที่ (2.74) และ (2.79)

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

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

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

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สำคัญสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

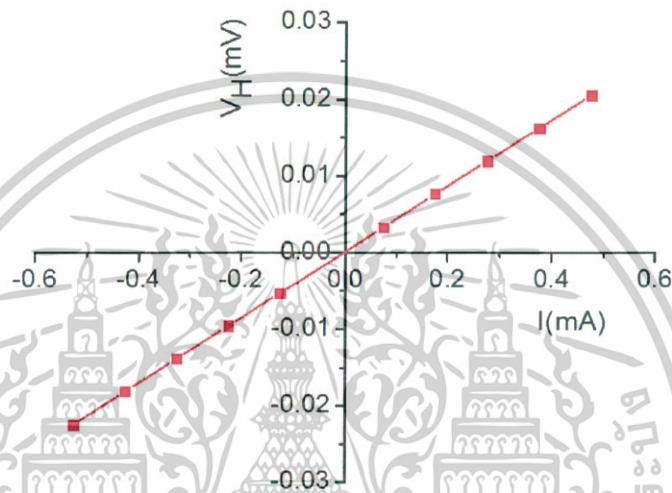
$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.85)$$

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง
 B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.84) จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

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

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดออกการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.625×10^{-34} จูล-วินาที
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

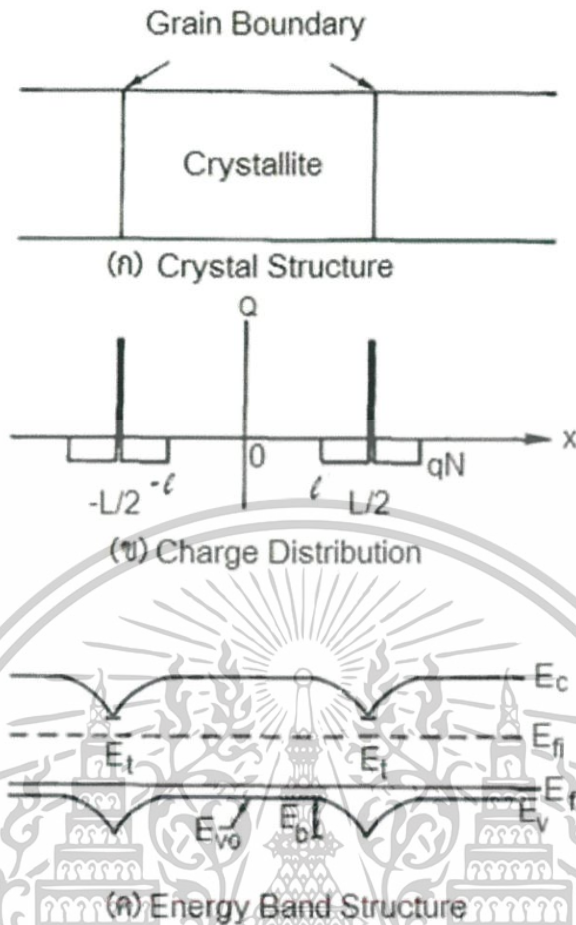
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เซโต (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนร่วมกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

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

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ

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

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

2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินิ (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มิ (E_F) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_i สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีโอกาส (2.89) ใช้

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

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

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

สมการที่ (2.90) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

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

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

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

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

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

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 ค่าความหนาแน่นของกักพาหะ N_c สามารถหาได้จากสมการที่ (2.88) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

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

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ(E_c) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

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

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.100) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

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

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

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

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

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

เมื่อ ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

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

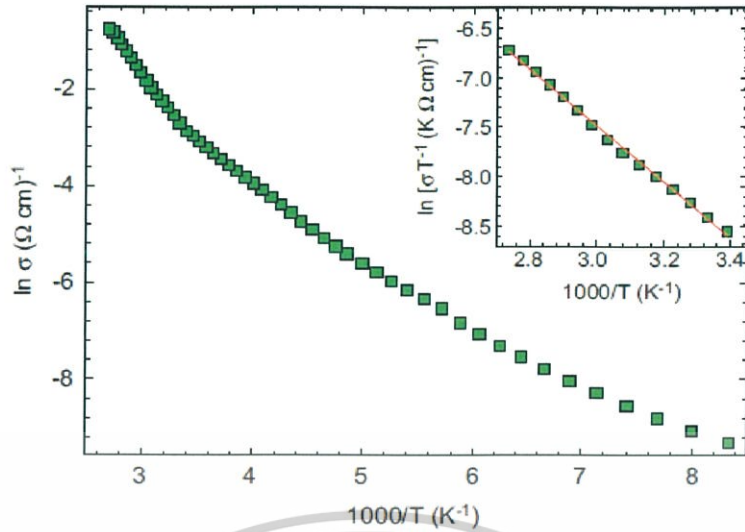
$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

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

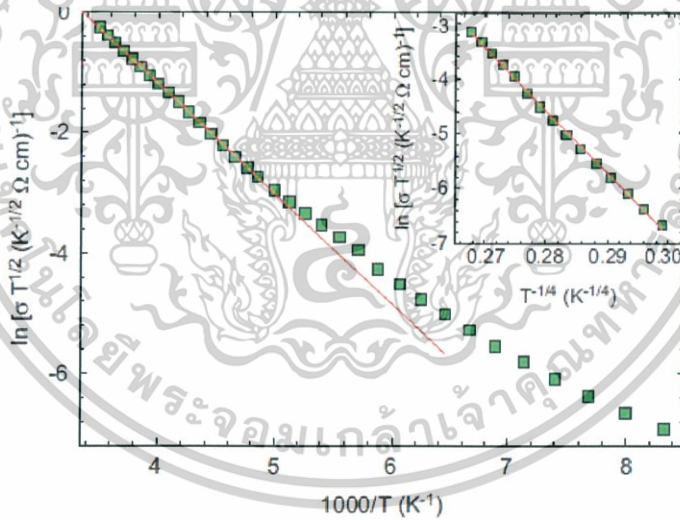
$$\sigma = e N_c^2 L v_c (2 \epsilon_s N_d^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (k T N_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.108)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

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

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.111) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนี้นำไปใช้

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.114)$$

เมื่อ ν	คือ	ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์
$N(E_F)$	คือ	ความหนาแน่นของสถานะที่ถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)
α	คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะที่ถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (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 (2.113) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

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

เอาสมการที่ (2.114) คูณกับสมการที่ (2.115) จะได้

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

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

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

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

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

ถ้าแทนสมการที่ (2.118) ลงในสมการที่ (2.117) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

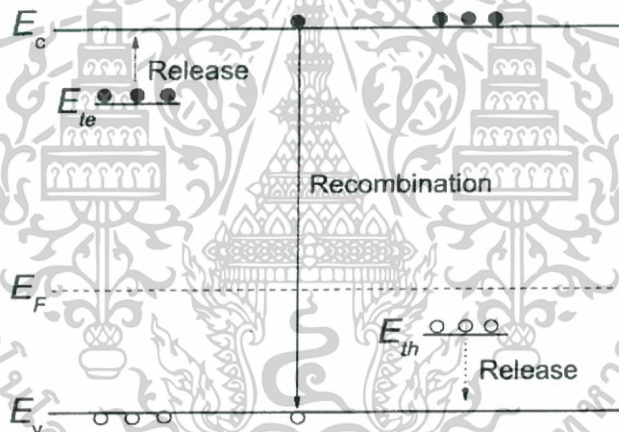
$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.124)$$

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

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือมัน (งามนิตย, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่ในการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนที่ใช้

อิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยให้อิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มาก เพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัว แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลาอันยาวนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อื้อ (persistent photoconductivity)



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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้วงวนเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/I$ ดังนั้นจะได้ว่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แทนสมการที่ (2.124) ลงในสมการที่ (2.125) จะได้

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

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

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

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

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

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักตักพาหะมีหลายชนิด กระจายรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์

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

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	ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
σ_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง $\ln \tau_r = \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) = \ln \tau_{ro} + \frac{E_t}{(1,000k)}\left(\frac{1,000}{T}\right)$ ซึ่งมีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\text{ความเข้มข้น} = \frac{E_i}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

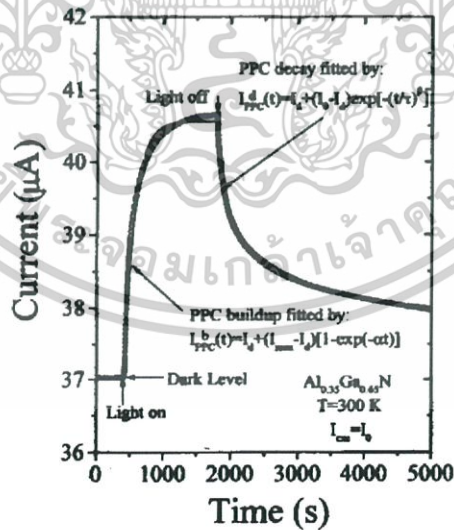
$$E_i = \frac{(1,000)k(\text{ความเข้มข้น})}{q} = (0.086)(\text{ความเข้มข้น}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.136)$$

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

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

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

$$I_p = I_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.138)$$



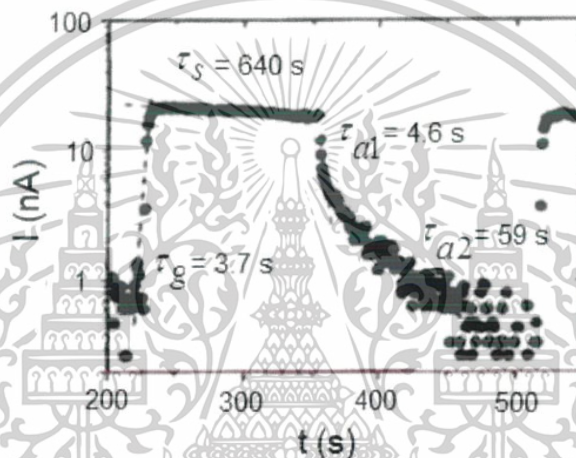
รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.136) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

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

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



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรันทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตไม่ได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.132) และสมการที่ (2.136) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{r1}\exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{r2}\exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.140)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.141)$$

จากสมการที่ (2.140) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{i2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.141) ดังนี้คือ

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

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.143)$$

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

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

และ

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.145)$$

สมการที่ (2.140) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

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

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

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตอร์ตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|I_p| = A_1' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r,1}}\right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r,1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.147)$$

ส่วนกรณีของชิ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.128) และ (2.140) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.148)$$

จากสมการที่ (2.147) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.149)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.150)$$

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

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.151)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.152)$$

สมการที่ (2.147) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

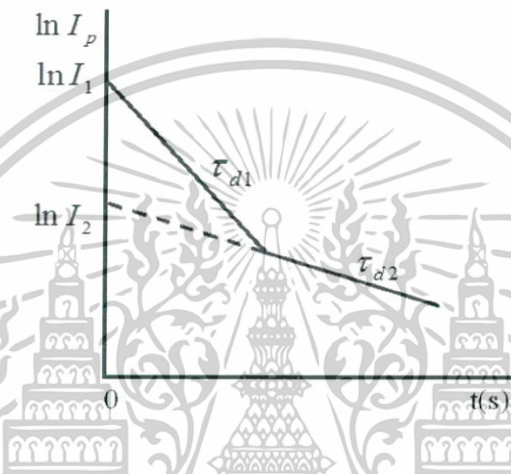
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.153)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิทกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้นก็
 เอกสสามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|I_p| = A_1^m \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) \right] + A_2^m \left\{ 1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.154)$$

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.31



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

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

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

เราสามารถหาค่า τ_{d1} ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ คือ

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

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

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

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

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.158)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชิ้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.159)$$

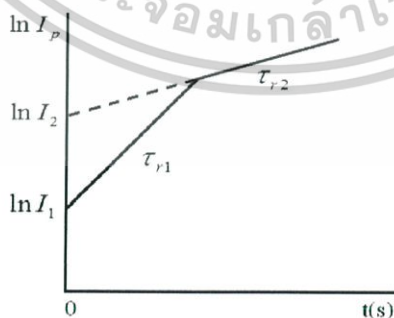
และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.160)$$

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ

$\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.32



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่าย ๆ ดังนี้คือ

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

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

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

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

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

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

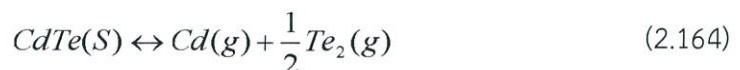
$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.163)$$

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

2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Space Sublimation:

CSS) (ฐิตินัย, 2556)

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

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

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$ คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

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

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ $J_{Cd,j}$ ทั้งสิ้น คือ พลັกซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J_{Te_2,j}$	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j
J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
D_{ij}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

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

$$\frac{P_{Cd}(T_{so})}{P_{Te_2}(T_{so})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1. \quad (2.171)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1 ดังนั้นจากสมการที่ (2.166), (2.167), (2.168), (2.169), (2.170) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

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

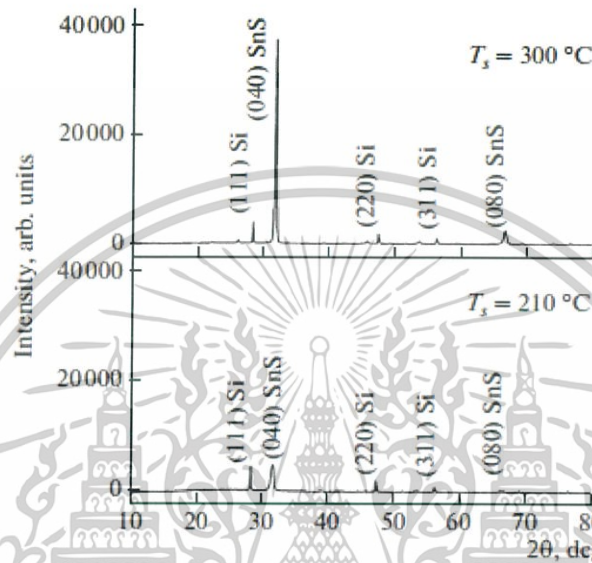
เมื่อ J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
M	คือ	มวลโมเลกุลของ $CdTe$
ρ	คือ	ความหนาแน่นของ $CdTe$

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Bashkirov, 2011)

ได้มีการรายงานว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในเตาเตรียมสารชนิดฝาผนังร้อนอุณหภูมิคงที่ (hot wall deposition) ให้เคลือบบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ดังรูปที่ 2.33) พบว่าฟิล์มบาง SnS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

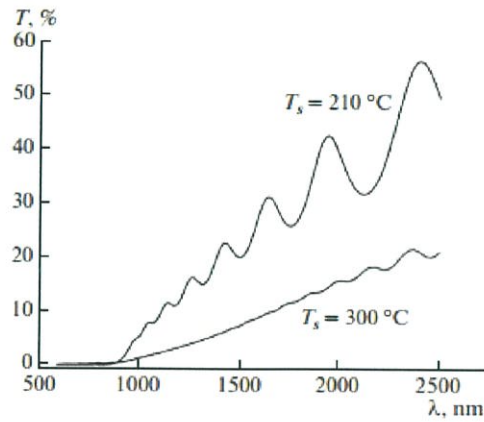
มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก โดยมีระนาบ (040) เป็นระนาบที่โดดเด่น สารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS เมื่อได้รับความร้อนสามารถที่จะระเหิดกลายเป็นไอของอะตอม Sn กับ S จากนั้นจึงควบแน่นกลายเป็นฟิล์มบางของสารประกอบ SnS บนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับกำหนดให้เป็น 210 และ 300 องศาเซลเซียสตามลำดับ



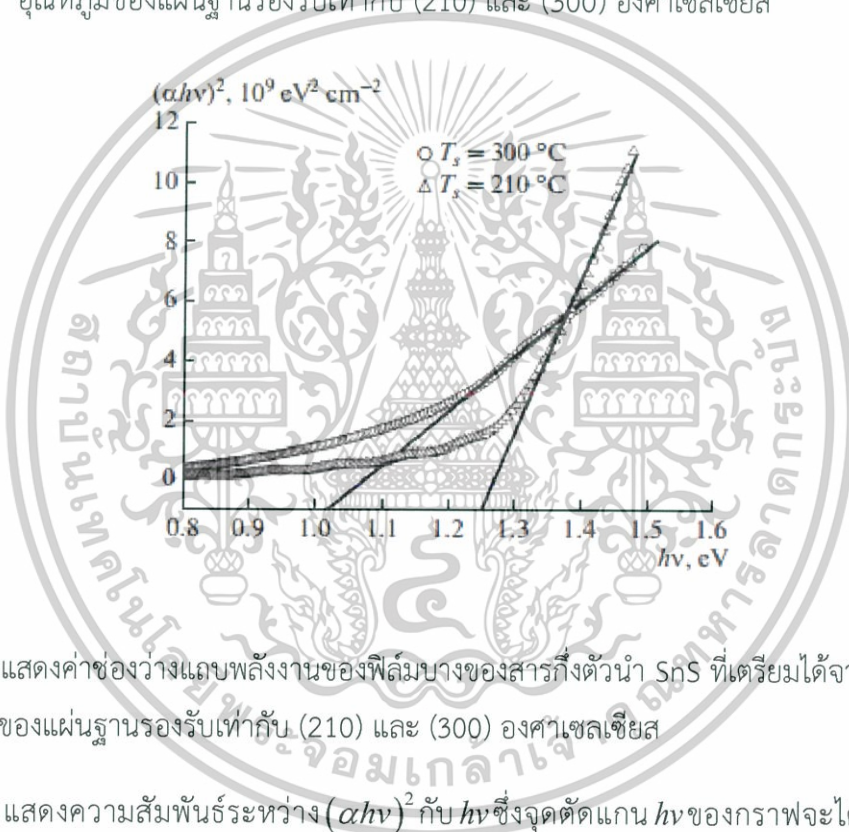
รูปที่ 2.33 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ (210) และ (300) องศาเซลเซียส

รูปที่ 2.34 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง SnS ที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียสจะมีค่าสูงกว่ากรณีใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส แสดงว่าการเตรียมฟิล์มบาง SnS ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ได้ความหนาแน่นของฟิล์มบางมากกว่า กรณีที่เตรียมด้วยอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ (210) และ (300) องศาเซลเซียส

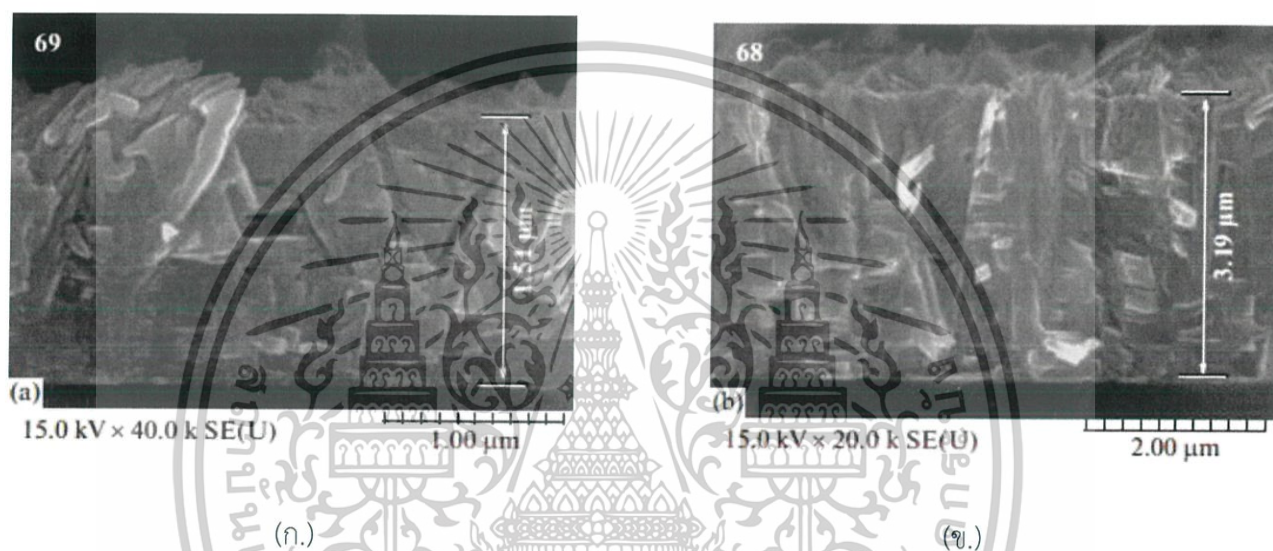


รูปที่ 2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ (210) และ (300) องศาเซลเซียส

รูปที่ 2.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ซึ่งจุดตัดแกน hv ของกราฟจะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง SnS พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ 300 องศาเซลเซียสมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = 1.07 eV$) ต่ำกว่า กรณีที่ใช้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส ($E_g = 1.27 eV$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของภาพตัดขวางของฟิล์มบาง SnS จะแสดงดังรูปที่ 2.36 พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นมากกว่า กรณีที่เตรียมด้วยอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส และเห็นได้อย่างชัดเจนว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 300 องศาเซลเซียสเกรนมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆซ้อนกัน โดยระนาบของแผ่นขนานไปกับผิวหน้าของกระจกสไลด์



รูปที่ 2.36 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส (ก.) และ 300 องศาเซลเซียส (ข.) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นอยู่ในช่วง 645-668 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับอยู่ในช่วง 530-593 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอตประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิจี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทิ้งสเดน 1,000 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 99.999 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปากคืบ
5. หน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี
6. แวนตากรองแสง
7. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีสามารถควบคุมความชื้นได้
8. ครกบดสาร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยที่จจะวัดจากมุม 20-70 องศา



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ

FEI รุ่น Quanta 250 โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า

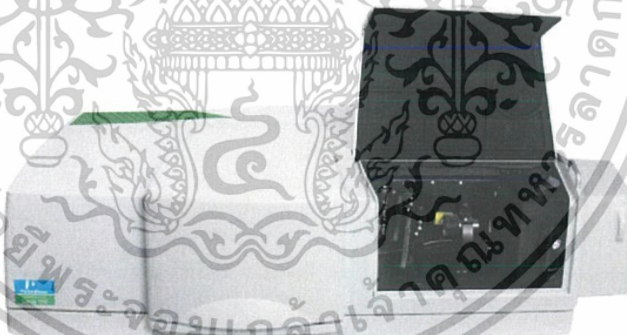
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750 โดยใช้ความยาวคลื่น 350-2500 นาโนเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องยูวี-วิไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 5. ก้าวเงิน
 6. สายไฟ

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆ ละ 10 นาที
5. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำปิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
6. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
8. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วแล้วเปิดปั๊มดูดอากาศออกจนกระทั่งมีความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์
4. ทำความสะอาดท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เช่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
5. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe



มวลอะตอมของธาตุ Sn, S และ Se มีค่าเท่ากับ 118.69, 32.06 และ 78.96 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ SnS} = 118.69 + 32.06 = 150.75 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ SnSe} = 118.69 + 78.96 = 197.65 \text{ กรัมต่อโมล}$$

กรณี $x=0.2$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SnS}_{0.8}\text{Se}_{0.2} &= 118.69 + (0.8 \times 32.06) + (0.2 \times 78.96) \\ &= 160.13 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.8 \times 150.75}{160.13} \right) = 0.7531 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.2 \times 197.65}{160.13} \right) = 0.2469 \text{ กรัม}$$

กรณี $x=0.4$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{SnS}_{0.6}\text{Se}_{0.4} &= 118.69 + (0.6 \times 32.06) + (0.4 \times 78.96) \\ &= 169.50 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.6 \times 150.75}{169.5} \right) = 0.5336 \text{ กรัม}$$

ของสารประกอบ SnSe = $\left(\frac{0.4 \times 197.65}{169.5} \right) = 0.4664$ กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาและเผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x=0.6$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{SnS}_{0.4}\text{Se}_{0.6} &= 118.69 + (0.4 \times 32.06) + (0.6 \times 78.96) \\ &= 178.88 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.4 \times 150.75}{178.88} \right) = 0.3371 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.6 \times 197.65}{178.88} \right) = 0.6529 \text{ กรัม}$$

กรณี $x=0.8$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{SnS}_{0.2}\text{Se}_{0.8} &= 118.69 + (0.2 \times 32.06) + (0.8 \times 78.96) \\ &= 188.26 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{SnS}_{0.2}\text{Se}_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ SnS} = \left(\frac{0.2 \times 150.75}{188.26} \right) = 0.1602 \text{ กรัม}$$

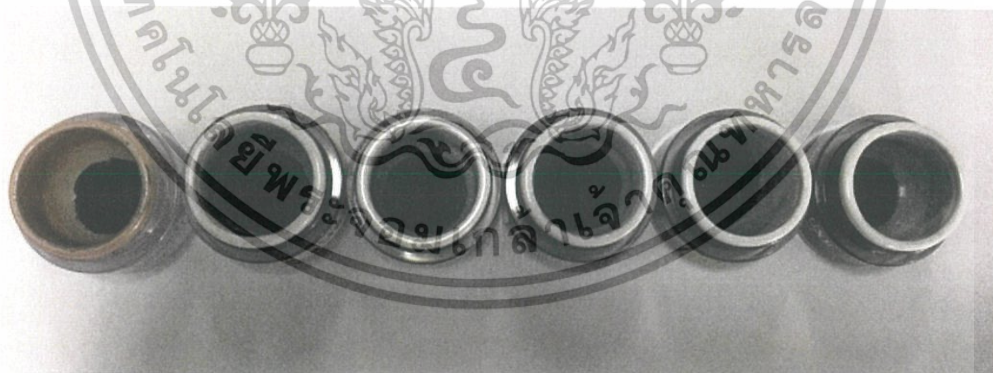
$$\text{ของสารประกอบ SnSe} = \left(\frac{0.8 \times 197.65}{188.26} \right) = 0.8399 \text{ กรัม}$$

หมายเหตุ : ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้จริงในแต่ละครั้งของการทดลองเท่ากับ 0.01 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

Molar Ratio (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Substrate Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
	SnS	SnSe		
0.0	1.0000	-	668	593
0.2	0.8338	0.1660	645	530
0.4	0.6529	0.3467	649	559
0.6	0.4554	0.5440	655	555
0.8	0.2387	0.7604	645	530
1.0	-	1.0000	650	571



รูปที่ 3.4 แสดงผงผลึกของสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ

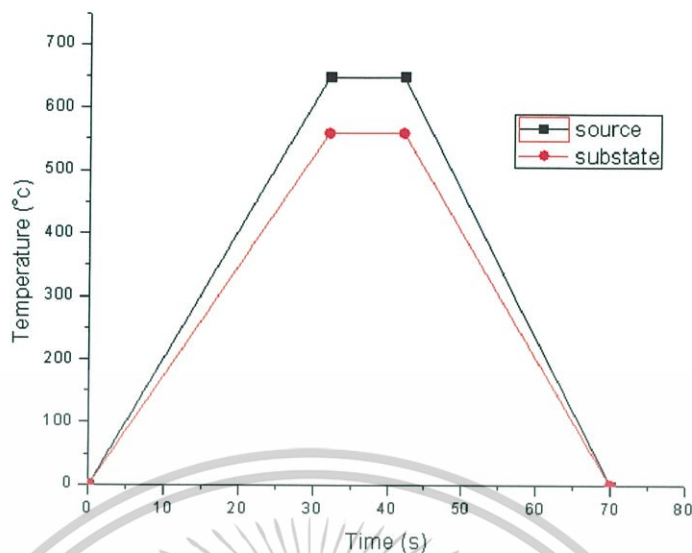
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ SnS และ SnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
5. นำอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4
7. เมื่อปลุกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าสมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 < x < 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



รูปที่ 3.6 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งาม นิตย , 2531; งาม นิตย , 2545; ฐิตินัย , 2549; ฐิตินัย , 2550; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5402 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ ของยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000, และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องเครื่องยูวี-วีไอเอส-เอ็นไออาร์ (UV-VIS-NIR) ยี่ห้อ LAMBDA 750 โดยใช้ความยาวคลื่น 350 ถึง 2500 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมไปทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303 – 473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

1. ต่อดวงจรมัดและใช้โปรแกรมร่วมด้วย 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

3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

จากหลักการแวนเดอร์เพอร์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้

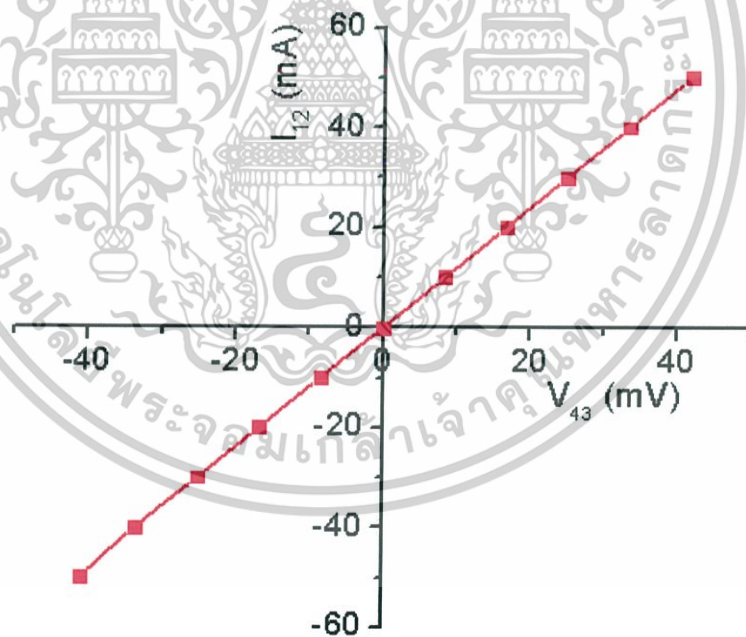


รูปที่ 3.7 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

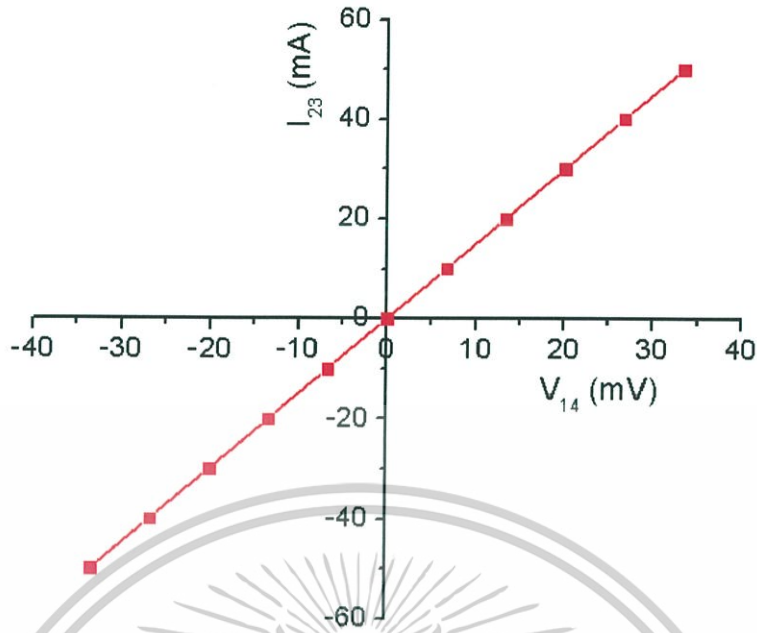
ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้วโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

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



รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 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

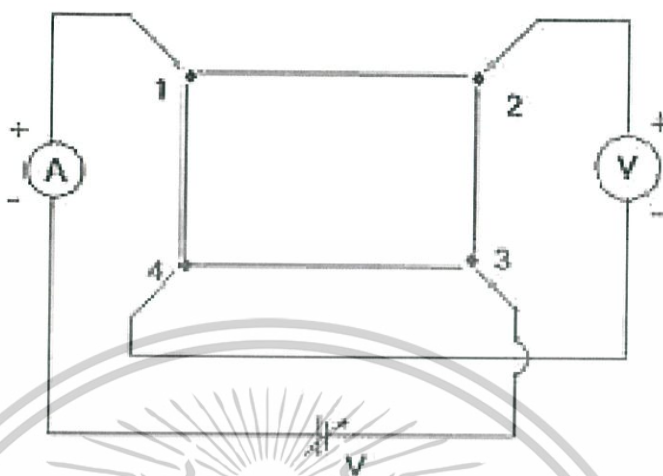
$$\rho = R_{sh} d$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

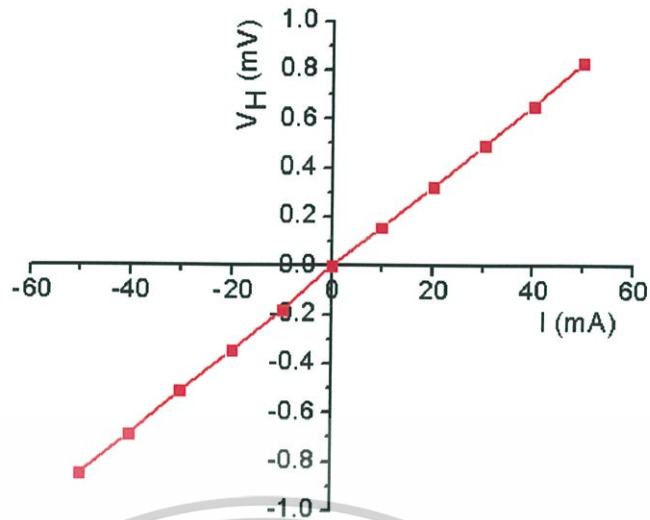
ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.10 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ จากสูตร

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

เมื่อ $\left(\frac{V_H}{I} \right)$ 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

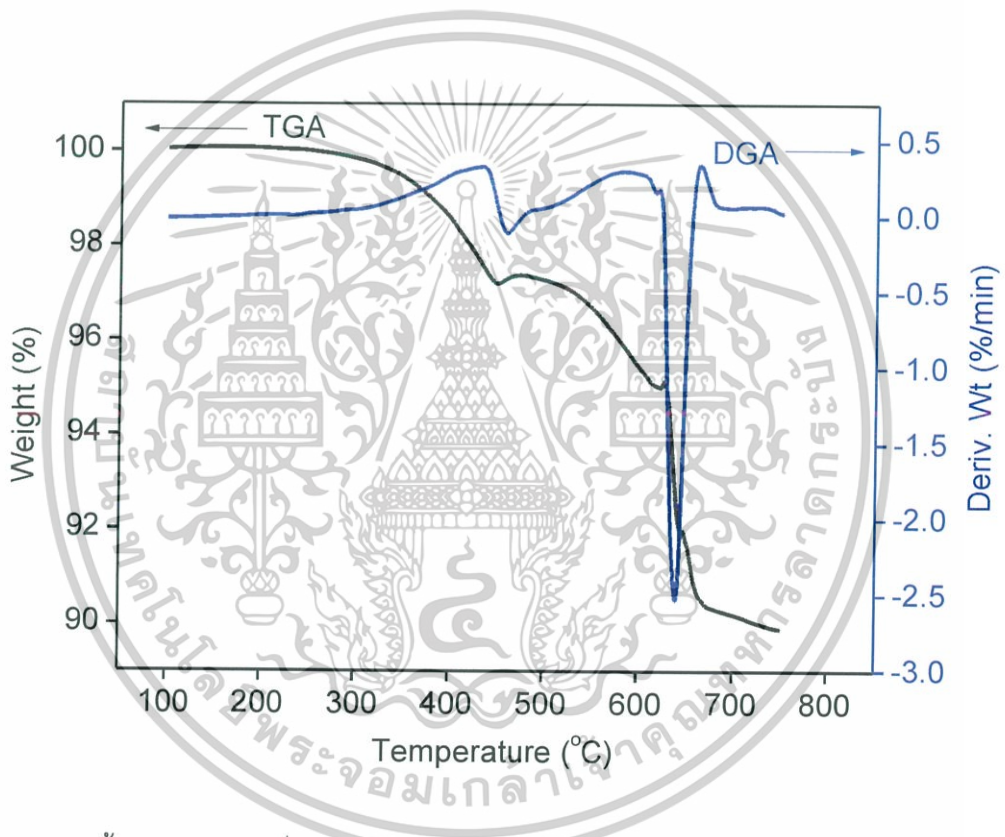
ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จะให้อุณหภูมิแก่ สารตั้งต้นเท่ากับ 645-668 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 530-593 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาทีและ 5 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศก๊าซออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0-800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะบ่งชี้บ่งบอกว่าสารตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาสลายความชื้น (dehydration) โดยใช้สารตั้งต้น 0.01 มิลลิกรัม

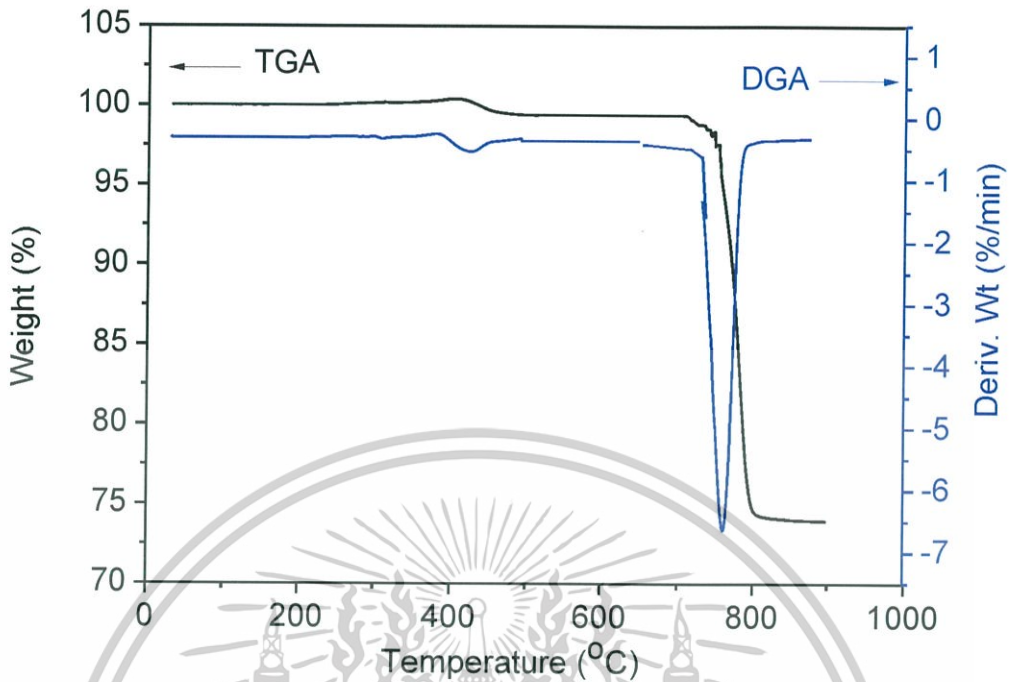
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-660 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ไป 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เป็นของแข็ง $\text{SnS}(s)$ เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ $\text{SnS}(g)$ ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 650-740 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น และจากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe จะลดลงไม่มากนักใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 630-690 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ไป 25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่เป็นของแข็ง SnSe(s) เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ SnSe(g) ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 630-690 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น ซึ่งอุณหภูมิของสารตั้งต้นที่ถูกเลือกจะอิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค อิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค และเชิงมหภาคลักษณะพื้นผิวและค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$)



รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

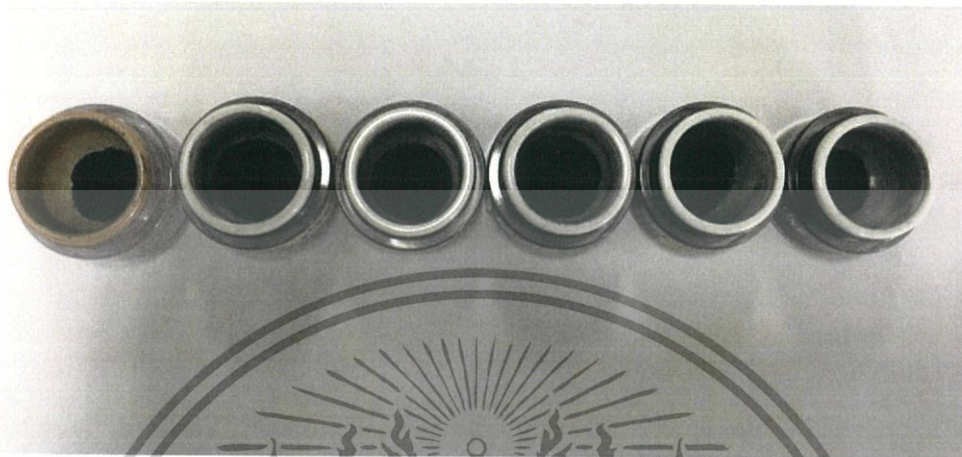


รูปที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ SnSe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

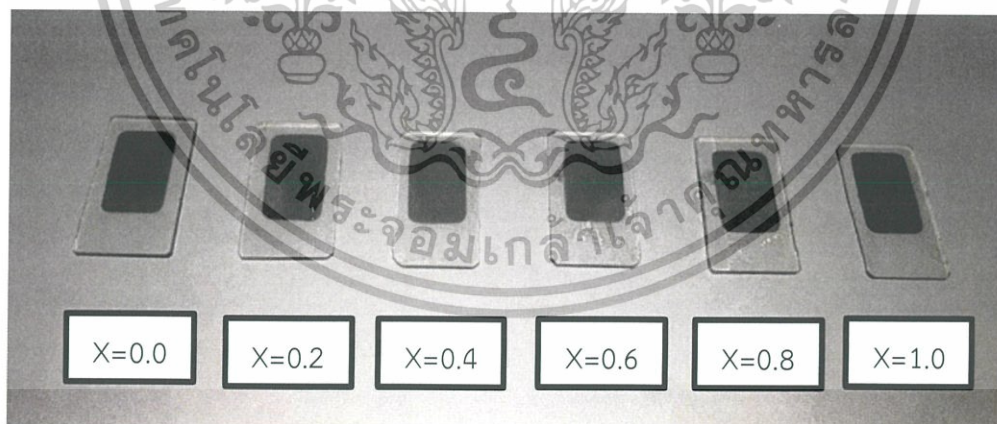
4.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ที่เศษส่วน โดยโมลอะตอม (X) = 0 ที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีเทา มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุนและที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีดำซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้น มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนแม้ทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnSe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 668 และ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 593 และ 571 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นอยู่ในช่วง 645-655 องศาเซลเซียส และใช้

อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับอยู่ในช่วง 530-559 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ภาพถ่ายของสารตั้งต้นและภาพถ่ายของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เตรียมได้ จะแสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

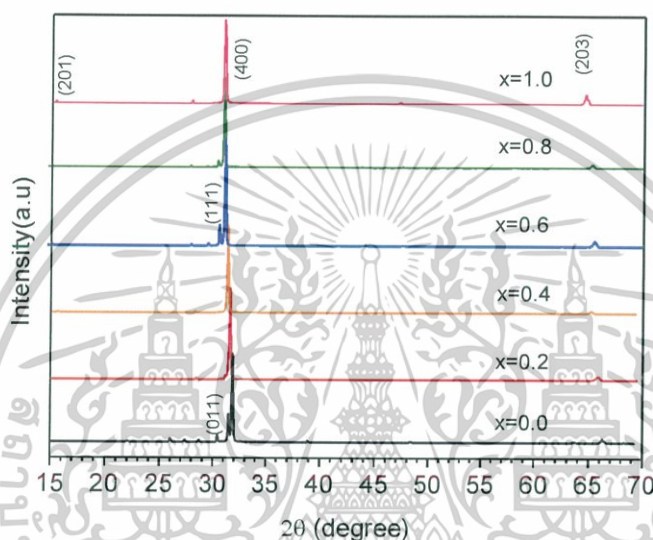


รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.5 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

จากรูปที่ 4.5 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด กรณีฟิล์มบางของสารประกอบ SnS จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพิกัดความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 31.997 องศา ตรงกับระนาบผลึก (400) สำหรับกรณีที่เจือด้วยสารประกอบ SnSe พบว่าเฟสมีการเลื่อนไปทางซ้ายซึ่งก็คือพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางค่ามุมเลี้ยวเบน 2θ ที่เล็กลง และในกรณีที่ฟิล์มบางของสารประกอบ SnSe พิกัดของระนาบ (400) จะเลื่อนไป ที่มุม 2θ เท่ากับ 30.994 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition(x)	2θ	(h,k,l)	Lattice Constant (\AA)			Volume (\AA^3)
			a	b	c	
0.0	26.450	(201)	11.1434	3.9650	4.3252	191.108
	30.574	(011)				
	31.609	(111)				
	31.999	(400)				
	66.900	(203)				
0.2	15.775	(200)	11.2637	3.9614	4.3277	193.109
	30.575	(011)				
	31.600	(111)				
	31.726	(400)				
	66.900	(203)				
0.4	15.575	(200)	11.3717	4.0026	4.3250	196.861
	30.550	(011)				
	31.275	(111)				
	31.450	(400)				
	66.900	(203)				
0.6	15.575	(200)	11.3964	4.0615	4.3247	200.165
	30.500	(011)				
	30.841	(111)				
	31.376	(400)				
	66.900	(203)				
0.8	15.500	(200)	11.4515	4.0892	4.3231	202.444
	30.475	(011)				
	30.644	(111)				
	31.226	(400)				
	66.900	(203)				
1.0	15.500	(200)	11.5186	4.2013	4.4558	215.637
	30.225	(111)				
	30.944	(400)				
	47.200	(302)				
	64.767	(203)				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม $0.0 \leq x \leq 1.0$ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ระนาบผลึกที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก ของทั้ง SnS และ SnSe คือระนาบ (400) ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

และ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.00)$$

สัมประสิทธิ์ของการจัดเรียงระนาบ (texture coefficient) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$T = \frac{\left(\frac{I_{measure}}{I_{standard}} \right)}{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{I_{measure}}{I_{standard}} \right)} \quad (4.01)$$

เมื่อ N คือจำนวนพีคที่ปรากฏ $I_{measure}$ คือความเข้มของพีคที่วัดได้ จากเครื่องเอกซเรย์ และ $I_{standard}$ คือ ความเข้มของพีคตามมาตรฐาน JCPDS

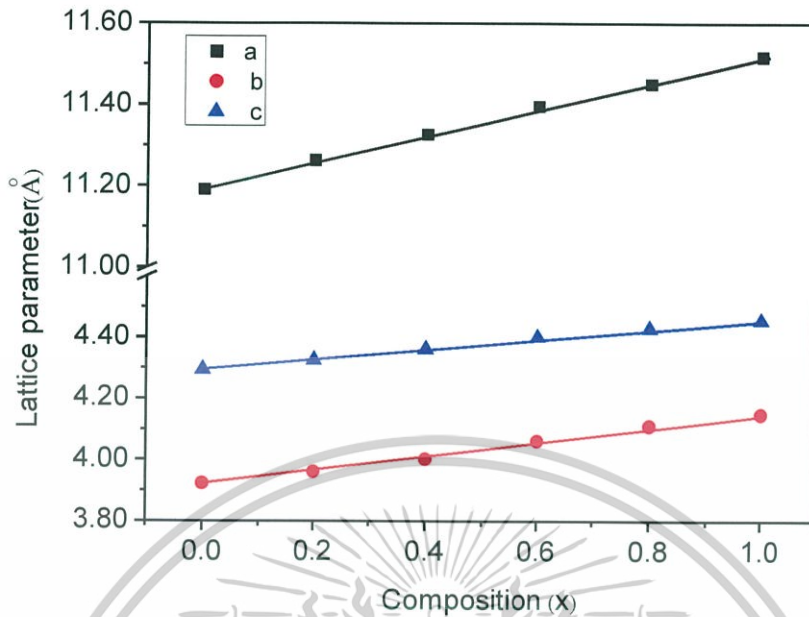
ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c สัมพันธ์กับเศษส่วนโมล (x) แบบเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องดีกับ กฎของวีการ์ต (Vegard's law) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$a = 0.323x + 11.143$$

$$b = 0.233x + 3.917$$

$$c = 0.164x + 4.296$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ SnSe สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.02)$$

$$D = \frac{(0.94)(0.154 \times 10^{-9})}{\frac{2\pi(0.16)}{360} \times \cos\left(\frac{31.999}{2}\right)} = 55.81 \text{ nm}$$

อีกทั้ง ขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพีคของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธีวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาผลของค่าความเครียดของสารตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = \beta_D + \beta_s \quad (4.03)$$

$$\beta = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} + (4\varepsilon \tan \theta) \quad (4.04)$$

$$\beta \cos \theta = \left(\frac{k\lambda}{D} \right) + (4\varepsilon \sin \theta) \quad (4.05)$$

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \left(\frac{k}{D} \right) + \left(\frac{4\varepsilon \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (4.06)$$

เมื่อ D คือ ค่าขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

β คือ ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่ง ของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ε คือ ค่าความเครียด

เมื่อทราบค่า β , θ และ λ จากผลการทดลองก็สามารถคำนวณหาค่า ε ได้

ส่วนความหนาแน่นดิสโลเคชัน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\text{Dislocation density} = \frac{1}{D^2} \quad (4.07)$$

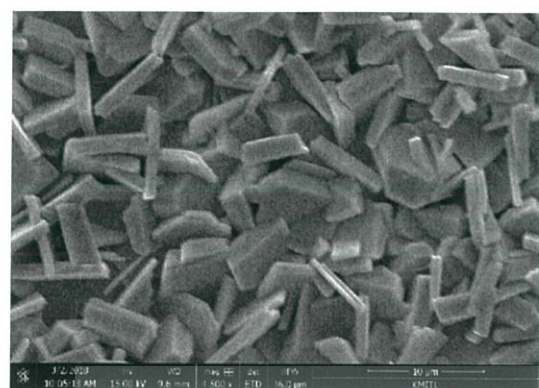
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะ

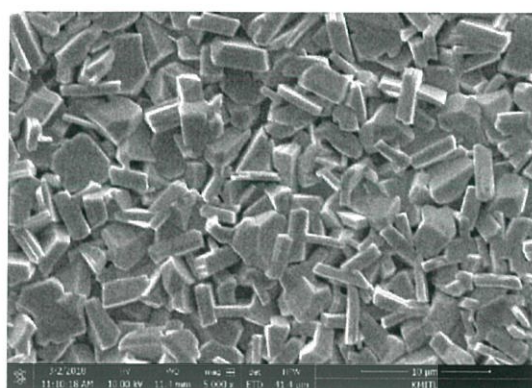
ของสภาพพื้นผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7

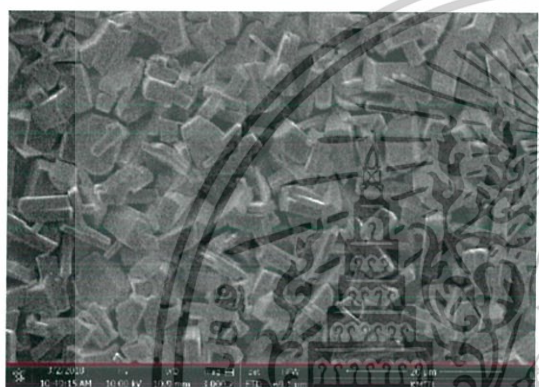
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



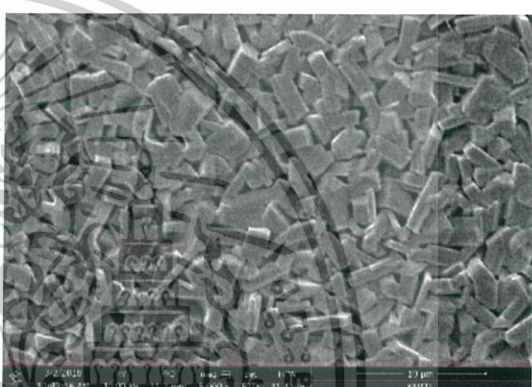
X=0.0



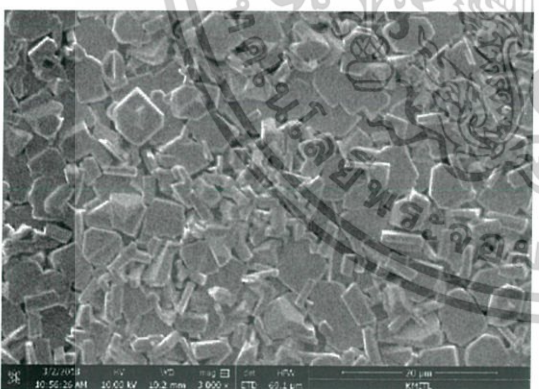
X=0.2



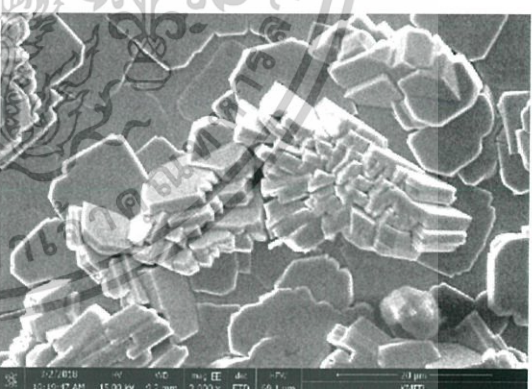
X=0.4



X=0.6



X=0.8



X=1.0

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

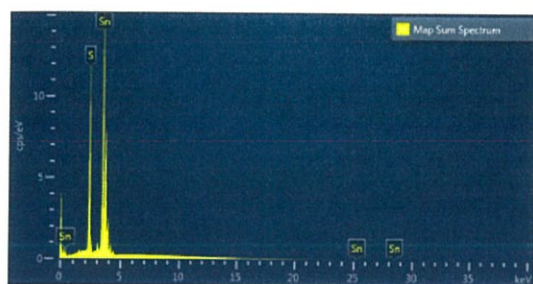
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Texture Coefficient	Grain size (nm) From XRD	Dislocation Density (line/m ²)	Strain (ϵ)
0.0	3.006	55.81	32.10×10^{13}	1.74×10^{-4}
0.2	3.798	55.77	32.15×10^{13}	1.40×10^{-4}
0.4	2.502	55.73	32.19×10^{13}	1.39×10^{-4}
0.6	3.354	55.72	32.20×10^{13}	1.38×10^{-4}
0.8	3.302	55.70	32.23×10^{13}	1.38×10^{-4}
1.0	2.163	55.66	32.27×10^{13}	1.88×10^{-4}

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

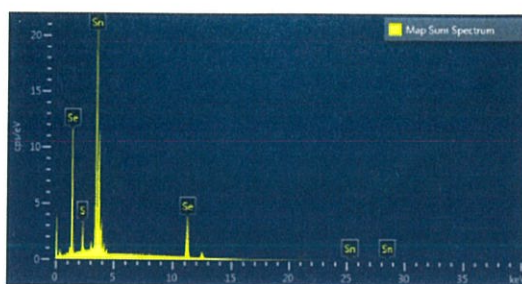
การศึกษากาการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดด้วย EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิด และปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



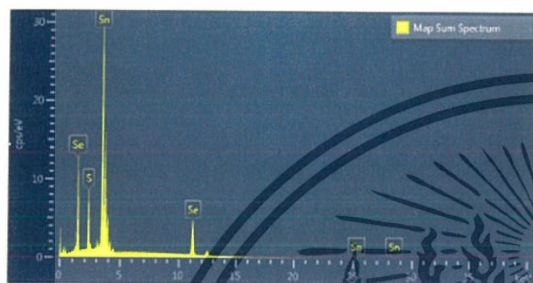
Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=0.0



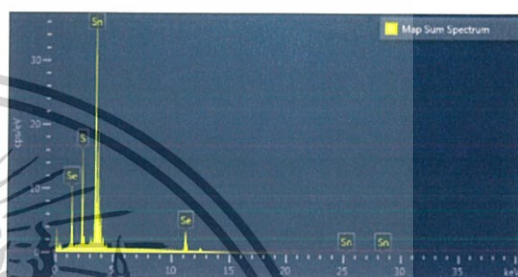
Full Scale 3121 Cursor. 0.000

X=0.2



Full Scale 3105 Cursor. 0.000

X=0.4



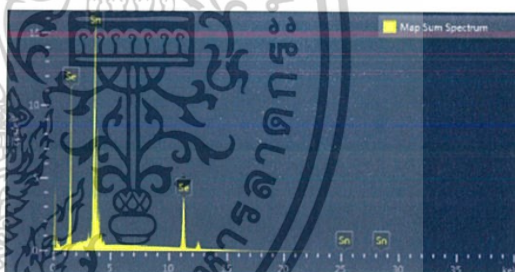
Full Scale 3176 Cursor. 0.000

X=0.6



Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=0.8



Full Scale 2765 Cursor. 0.000

X=1.0

รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

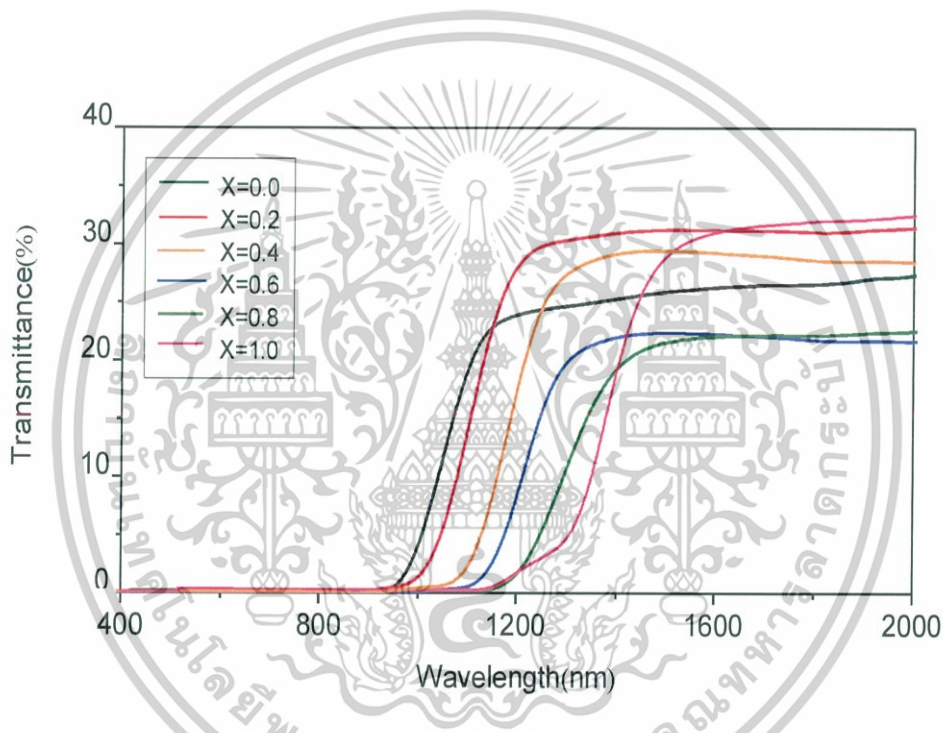
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Weight (%)			Atomic (%)		
	Sn	S	Se	Sn	S	Se
X=0.0	80.20	19.80	-	52.25	47.25	-
X=0.2	69.10	10.15	20.75	50.15	27.24	22.63
X=0.4	69.47	10.97	19.76	49.97	28.67	21.36
X=0.6	63.14	6.33	30.53	47.67	17.69	34.65
X=0.8	61.64	3.20	35.16	48.79	9.37	41.84
X=1.0	57.78	-	42.22	47.66	-	52.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

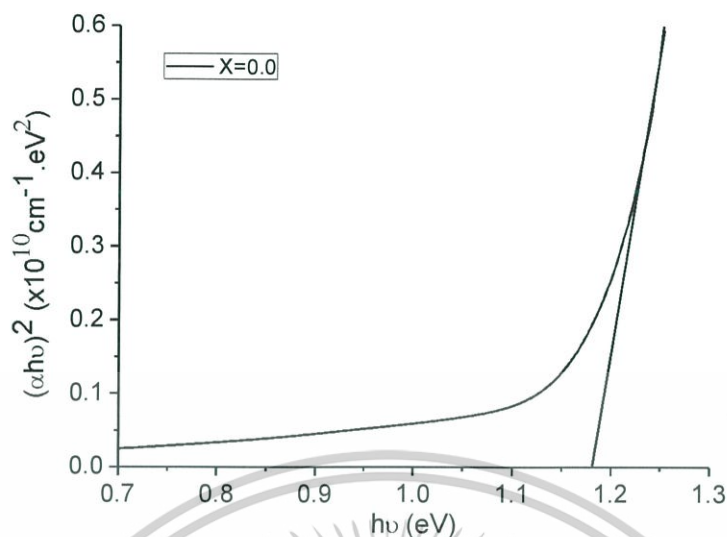
4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



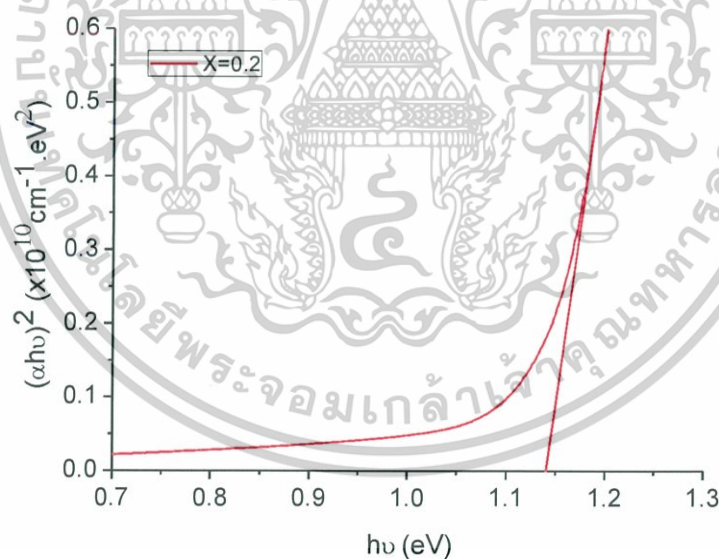
รูปที่ 4.9

แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

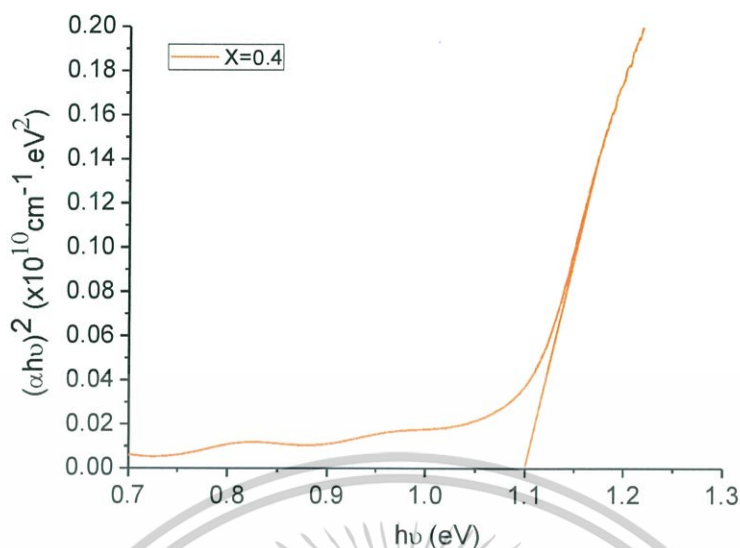


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.0$

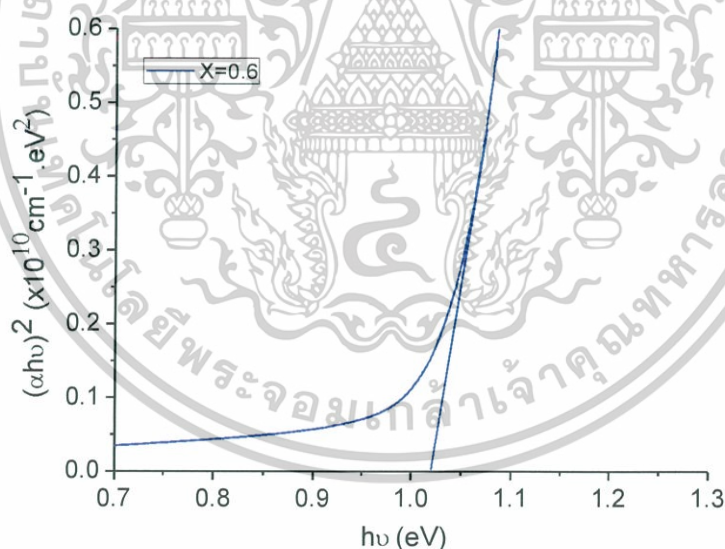


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

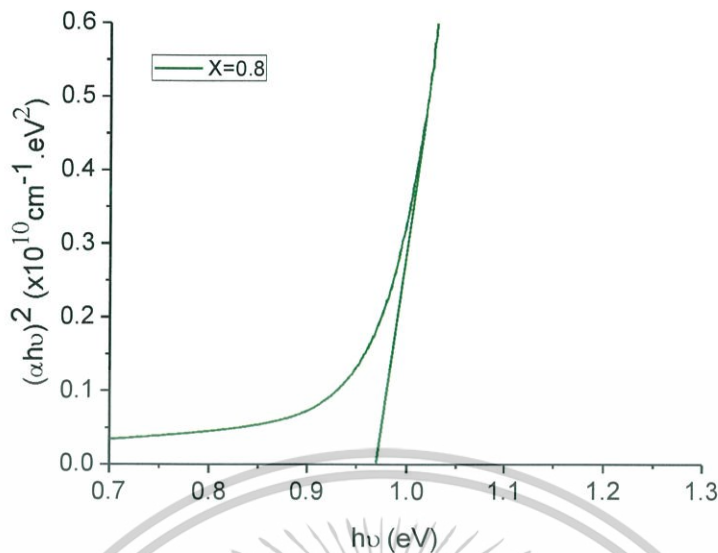


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.4$

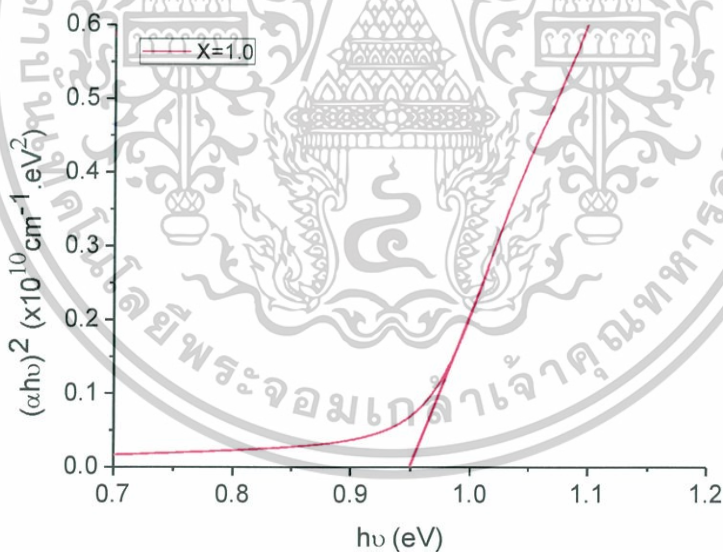


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

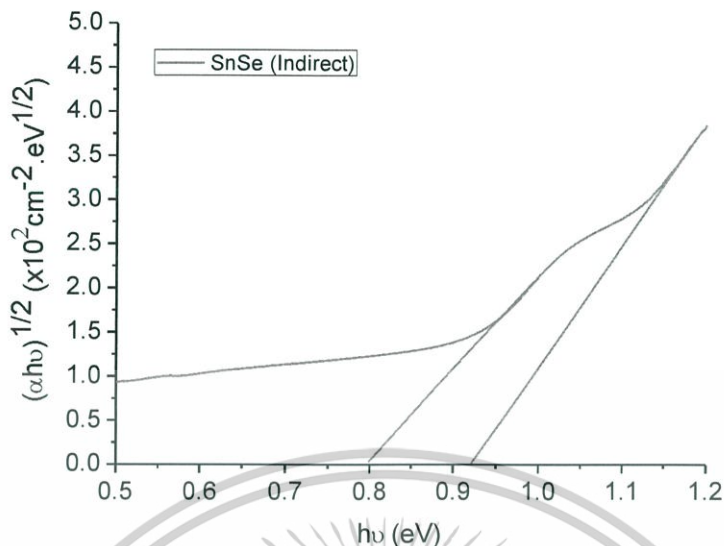


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=0.8$

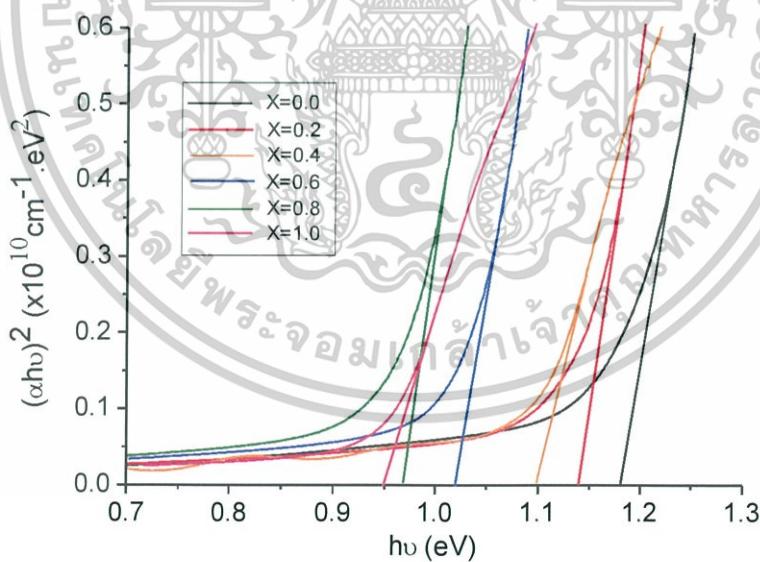


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ $X=1.0$ (Indirect)

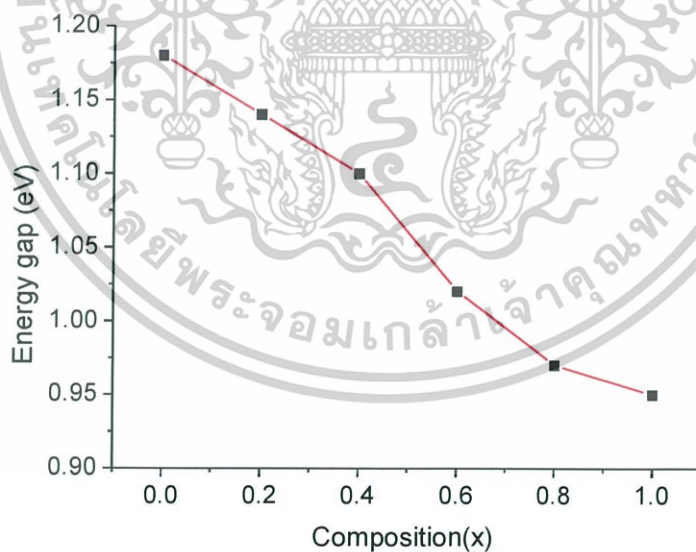


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ X เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Energy Gap (eV)
0.0	1.18
0.2	1.14
0.4	1.10
0.6	1.02
0.8	0.97
1.0 (direct gap)	0.95
1.0 (indirect gap)	0.8,0.92

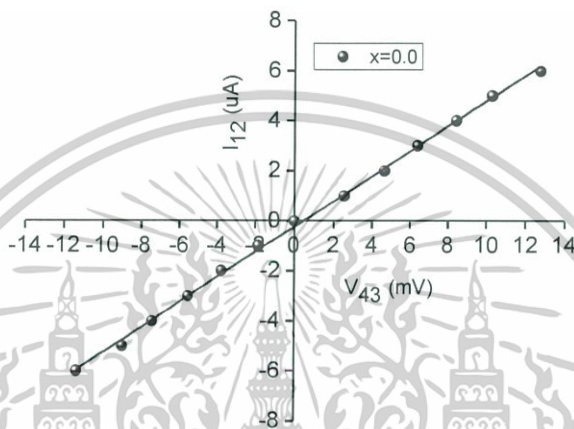


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

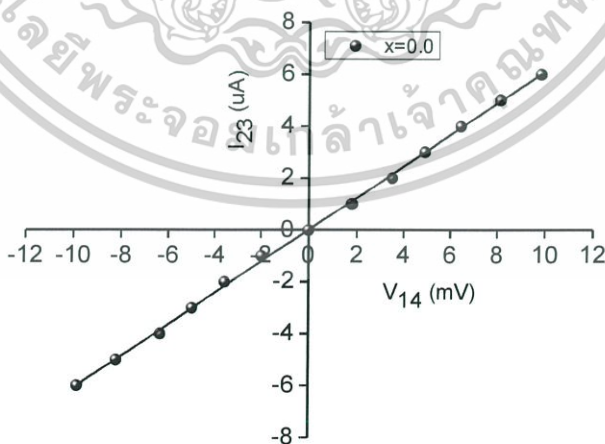
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

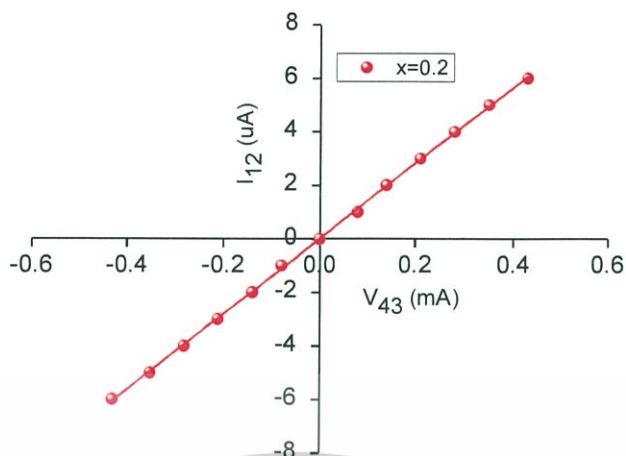
4.5.1 ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



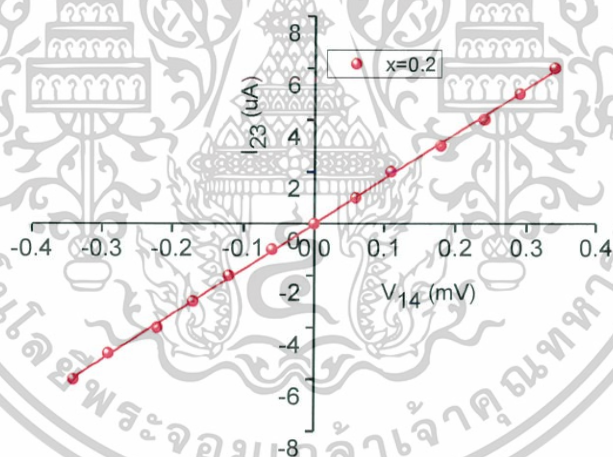
รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)



รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ (ค่า x ไม่จำกัด) ($x=0.0$) ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

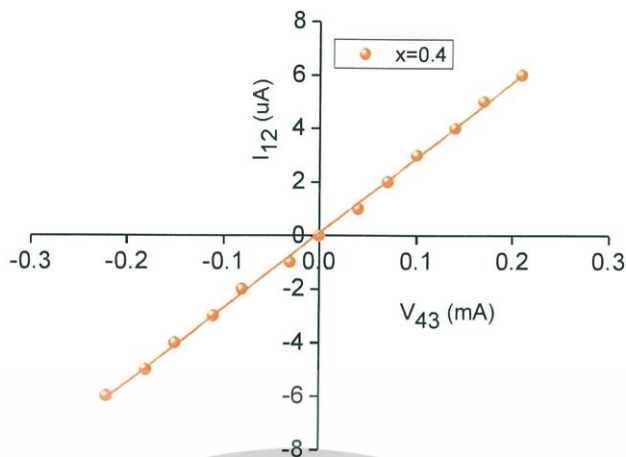


รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)



รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

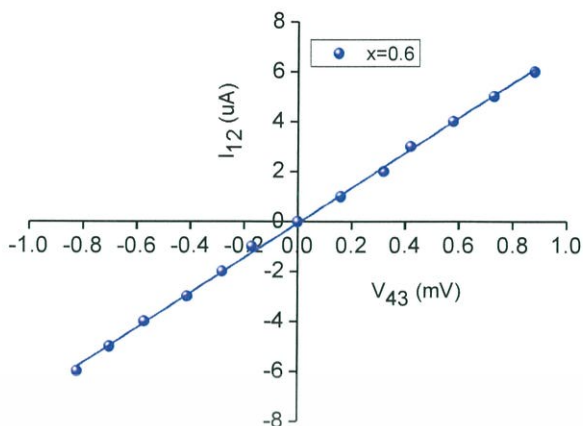


รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

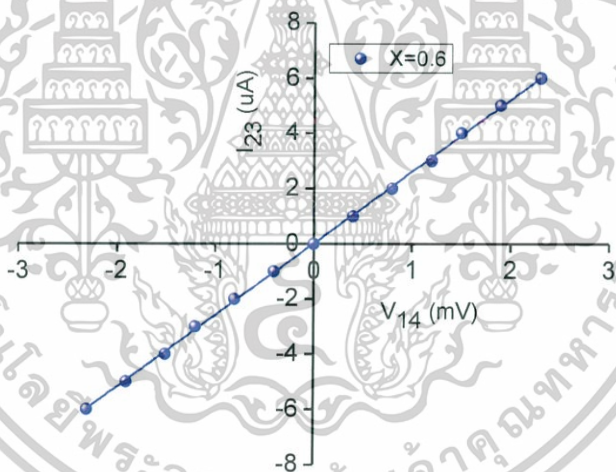


รูปที่ 4.24 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

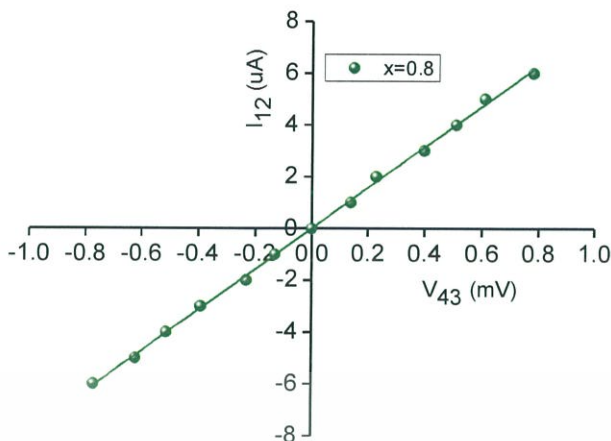


รูปที่ 4.25 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์วี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

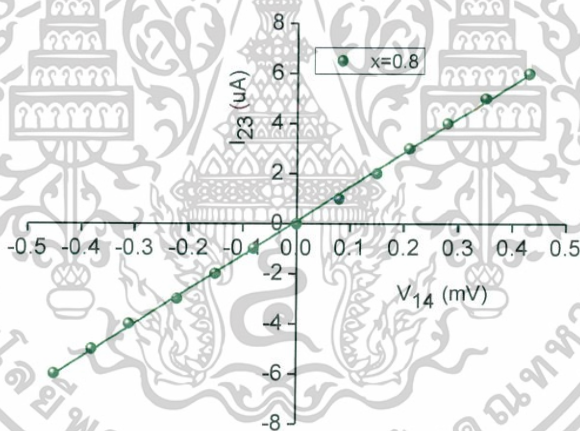


รูปที่ 4.26 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์วี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

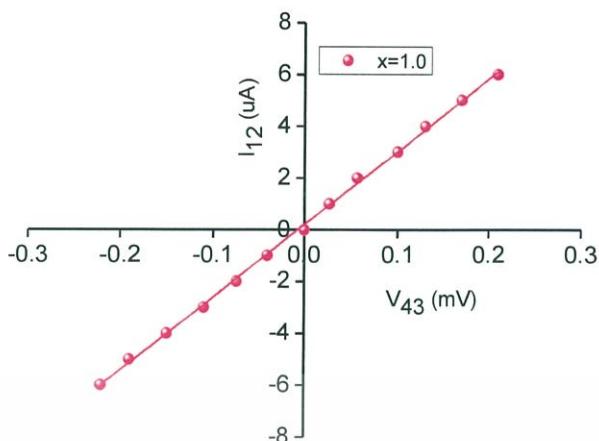


รูปที่ 4.27 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

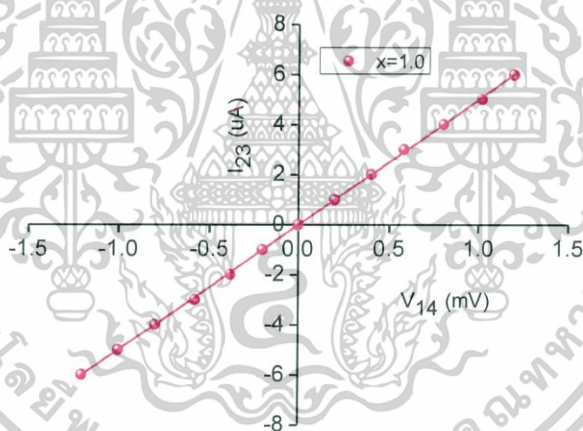


รูปที่ 4.28 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



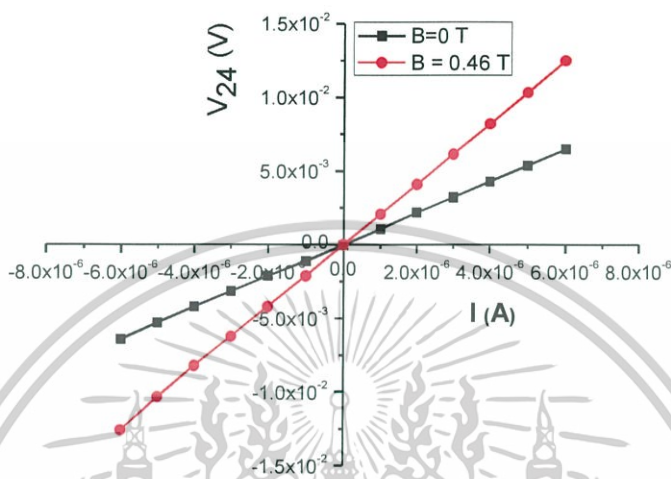
รูปที่ 4.29 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ที่ได้จากกราฟวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)



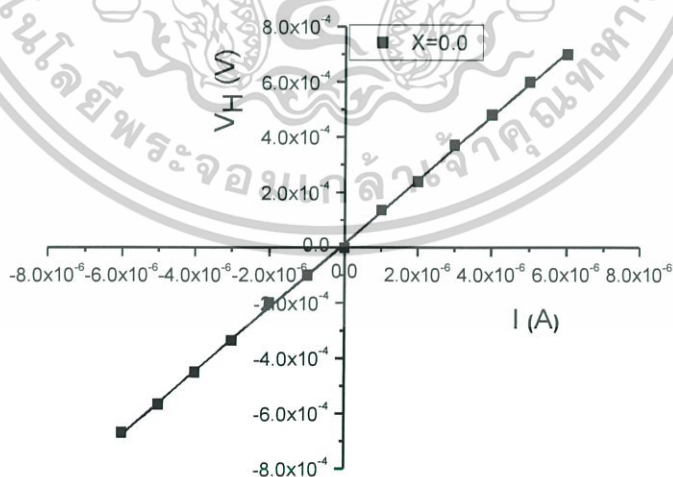
รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ที่ได้จากกราฟวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

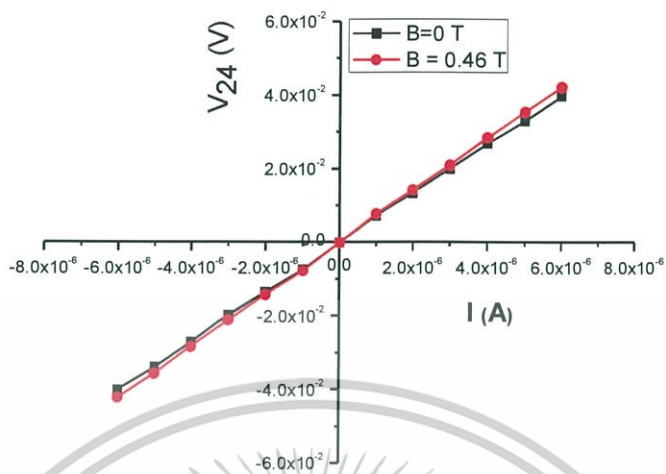
4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด



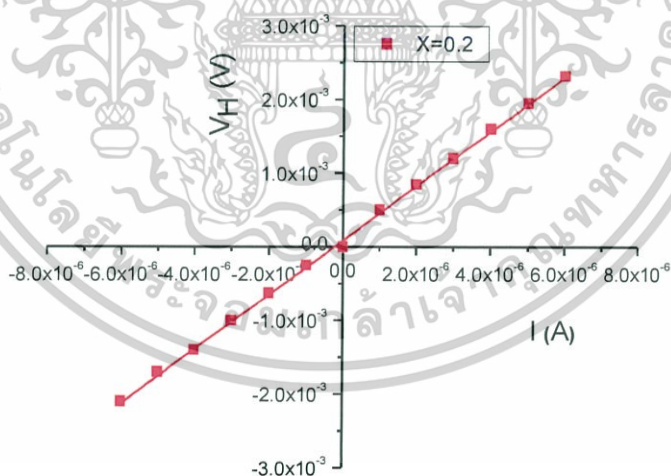
รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.0$)

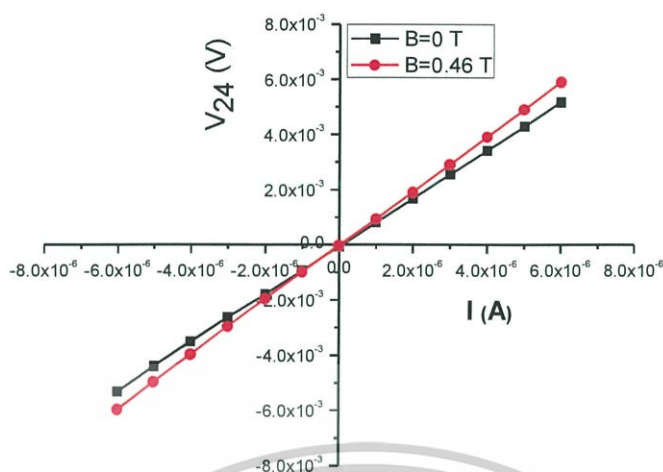


รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

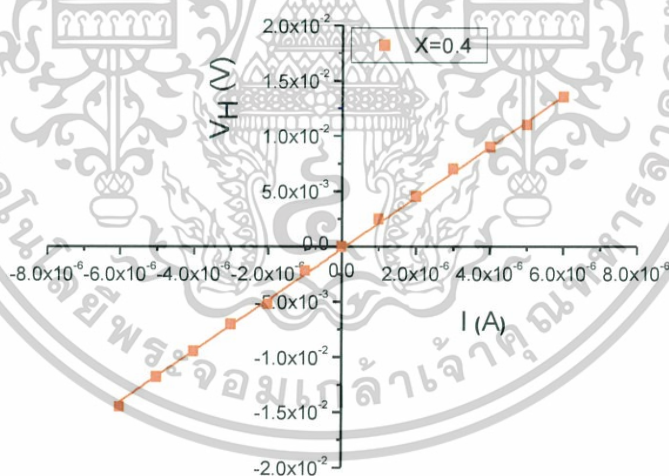


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

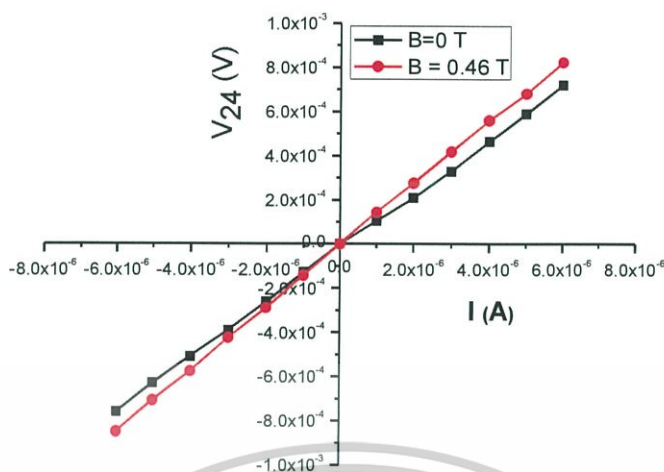


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

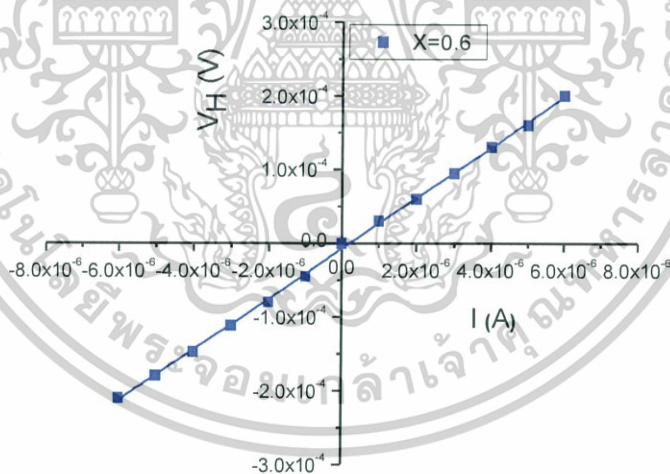


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.4$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

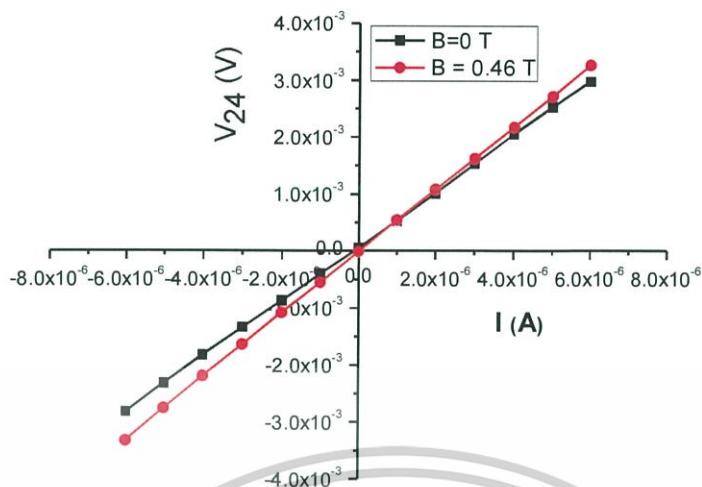


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

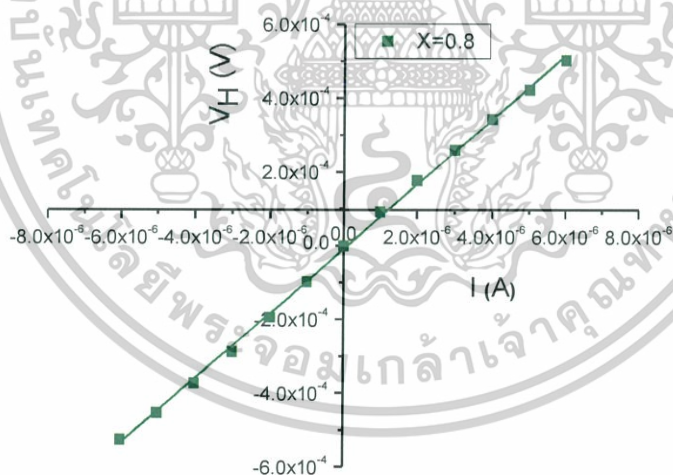


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

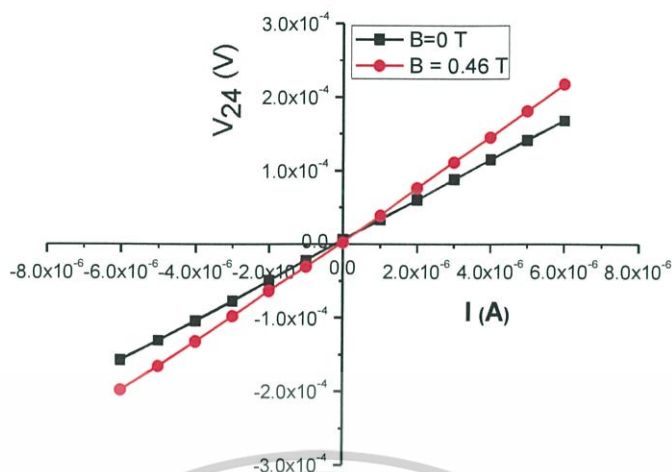


รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

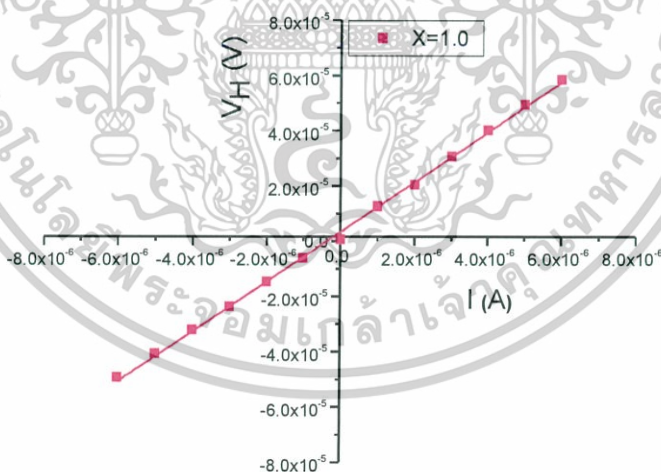


รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.8$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

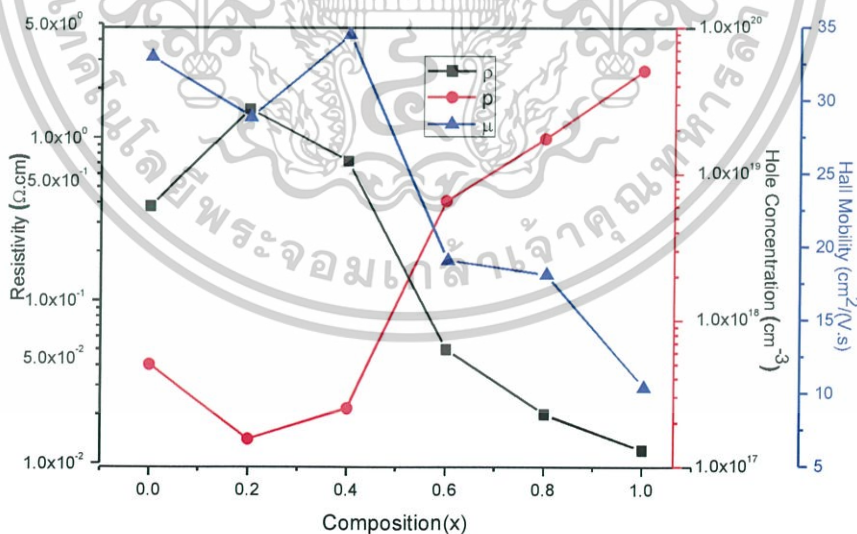


รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=1.0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

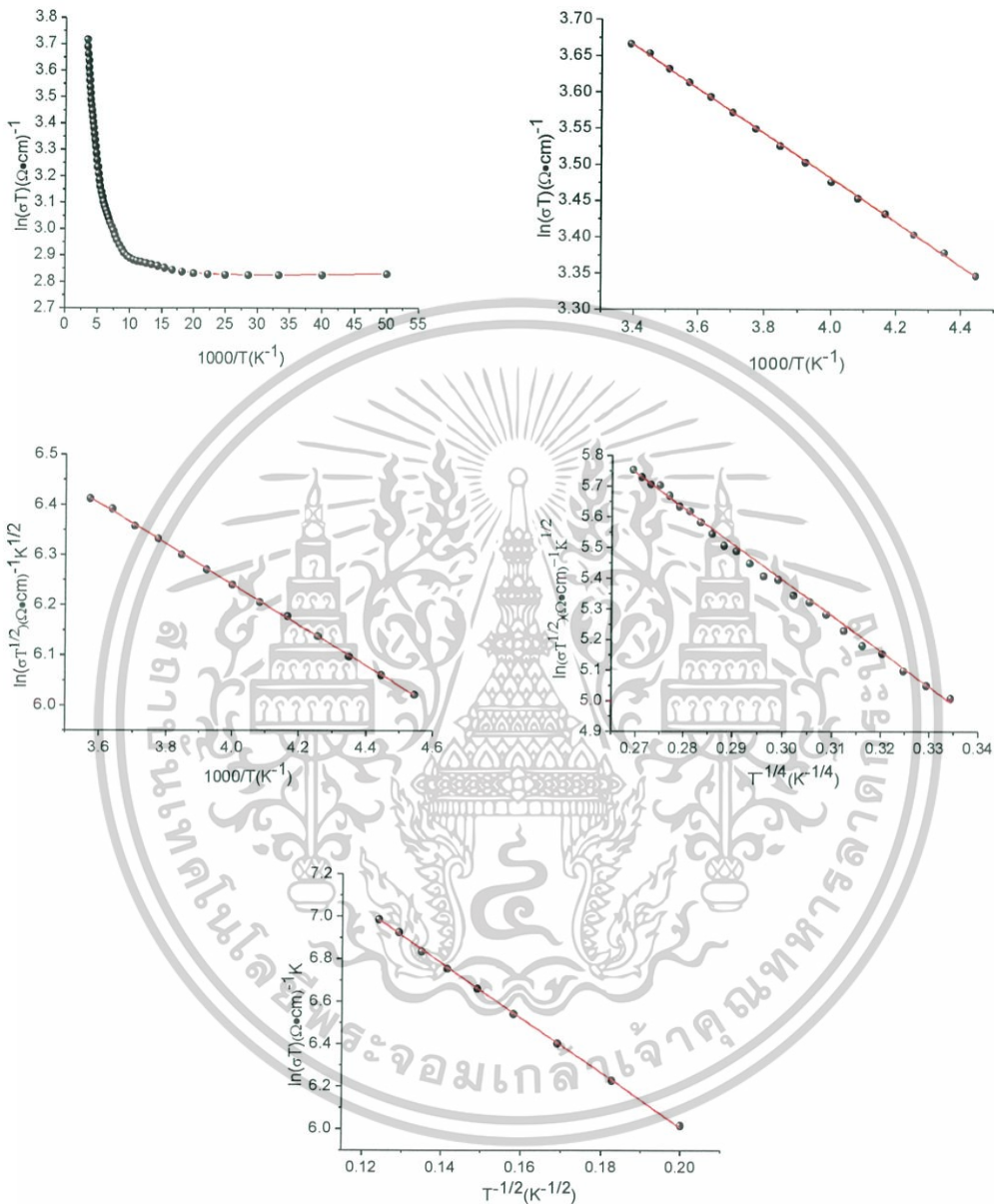
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition (x)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Constant (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)
0.0	7.560×10^3	0.380	12.50	5.02×10^{17}	32.89
0.2	2.812×10^4	1.400	40.60	1.54×10^{17}	28.80
0.4	1.435×10^4	0.720	24.80	2.52×10^{17}	34.44
0.6	4.337×10^2	0.050	0.95	6.57×10^{18}	19.01
0.8	1.094×10^3	0.020	0.36	1.74×10^{19}	18.02
1.0	4.419×10^3	0.012	0.124	5.08×10^{19}	10.33



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ เวลาในการระเหิด 10 นาที

4.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$

กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิด

สารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ ($x = 0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส นนำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโตที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นกรณี $N_d < N_d^*$ เกรนของผลึกจะเป็นสถานะพร่องพาหะทั้งหมด (entirely depleted) เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์

$$\sigma T^2 = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.08)$$

$$\ln\left(\sigma T^2\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\sigma_0 \quad (4.09)$$

$$\ln\left(\sigma T^2\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\sigma_0 \quad (4.10)$$

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\text{ความชัน} = \frac{E_a}{1000k} \quad (4.11)$$

แทนค่า

$$E_a = \frac{1000k(\text{Slope})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (4.12)$$

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(-0.7132)}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.0615 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.13)$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของ SnS มีค่าเท่ากับ 10.64

แทนค่า

$$\epsilon_s = (10.64)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 9.416 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (4.14)$$

$$N_a = \frac{8 \epsilon_s E_b}{e^2 L^2} \quad (4.15)$$

แทนค่า $N_a = \frac{8(9.416 \times 10^{-13})(0.0615)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (55.81 \times 10^{-7})^2} = 9.295 \times 10^{20}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

แทนค่า $L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)(9.416 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (9.295 \times 10^{20})} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.286 \times 10^{-8}$ เซนติเมตร

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (4.17)$$

$$E_t = \frac{1}{2} E_g - E_a \quad (4.18)$$

แทนค่า $E_t = \frac{1}{2}(1.12) - 0.0615 = 0.4985$ อิเล็กตรอนโวลต์

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_t)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.19)$$

$$N_t = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a \quad (4.20)$$

สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ (v_c) ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.21)$$

แทนค่า $v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)}{2\pi(0.2 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 5.8129 \times 10^4$ เซนติเมตรต่อวินาที

สามารถหาค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (N_v) ได้จาก

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.22)$$

มวลยังผลของ SnS และ SnSe มีค่าเท่ากับ $0.2m_0$ และ $0.15m_0$ ตามลำดับ

แทนค่า $N_v = 2 \left[\frac{2\pi(0.2 \times 9.1 \times 10^{-31}) \times 1.38 \times 10^{-23} \times 280}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}}$

$N_v = 2.0156 \times 10^{24}$ ต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้น $N_t = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$ (4.23)

$$N_t = \left[\frac{(55.81 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (2.0156 \times 10^{24}) (9.295 \times 10^{20}) (5.8129 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (280) (1.5471 \times 10^{-9})} \right] \times$$

$$\exp\left(-\frac{0.0615 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 280}\right) + (55.81 \times 10^{-7} \times 9.295 \times 10^{20})$$

$$= 5.1875 \times 10^{15} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณจากแบบจำลองของซีโตของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Temperature Range (K)	ϵ_s (F/cm^2) ($\times 10^{-13}$)	E_b (eV)	N_d (cm^{-3}) ($\times 10^{20}$)	E_t (eV)	N_t (cm^{-2}) ($\times 10^{15}$)	L_D (cm) ($\times 10^{-8}$)
280-220	9.416	0.034	5.277	0.470	2.940	1.641

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ เพื่อกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่ละเอียดเข้ามาแกว่งค้ำยที่ขอบของเกรนได้ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเสตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนตัดัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (4.24)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (4.25)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_{NNH}}{1000k}$$

$$E_{NNH} = -\frac{1000k}{1.6 \times 10^{-19}} (\text{ความชัน}) \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น $E_{NNH} = -\frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.5406)}{1.6 \times 10^{-19}}$ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{NNH} = 0.04663 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_{0,NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s} \quad (4.27)$$

$$N_d = \left[\frac{E_{0,NNH} 4\pi\epsilon_s}{0.99e^2} \right]^3 \quad (4.28)$$

$$N_d = \left[\frac{(4\pi)(9.425 \times 10^{-13})(0.04663)(1.6 \times 10^{-19})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right]^3$$

$$N_d = 4.2384 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่

N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{01} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B} \quad (4.29)$$

สมการที่ (3) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ ค่า k นี้คือ อัตราส่วนของ $\frac{N_a}{N_d}$ (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F)e^2}{2\epsilon_2} \right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d} \right)^{1/2} \quad (4.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_d คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

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

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

จากสมการ
$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (4.31)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{0,NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (4.32)$$

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

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,NNH}$ (S/cm) (10^3)	$E_{0,NNH}$ (meV)	T_{cl} (K)	N_a (cm^{-3}) (10^{19})	k
295-220	1.10	26.49	183.74	7.77	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^s \right] \quad (4.33)$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s} \quad (4.34)$$

ในกรณีที่พาหะสารกึ่งตัวนำได้ 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยตัวเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างที่เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชกลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{(-1/4)}$ จาก ค่าความชันของกราฟเส้นตรง

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ ค่าแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (σ_0)

$$m = -T_0^{(1/4)} = -48.606$$

$$T_{0,Mott} = (-14.5636)^4 = 4.4986 \times 10^4 \text{ เคลวิน}$$

$$c = \ln \sigma_0 = 8.5676$$

$$\sigma_0 = e^{8.5676} = 5.2585 \times 10^3 \text{ S / cm} \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี $[N(E_F)]$

โดยที่ $T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$ เมื่อ $\alpha = 2.3678 \times 10^7$ ต่อเซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นโปรดอย่าไปเผยแพร่หรือใช้เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_0} \quad (4.35)$$

$$N_0(E_F) = \frac{18(2.3678 \times 10^7)^3}{\left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}}\right)(4.4986 \times 10^4)}$$

$$N_0(E_F) = 6.1584 \times 10^{22} \text{ eV}^{-1}$$

$$= 6.1584 \times 10^{22} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{\text{hop,mott}}$)

$$\text{โดยที่ } R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9 \xi_{\text{mott}}}{8\pi k_b T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.36)$$

$$R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9}{8\pi \alpha \left[\frac{k_b}{q} \right] T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R_{\text{hop,mott}} = \left[\frac{9}{8\pi (2.3678 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}}\right) (190) (6.1584 \times 10^{22})} \right]^{\frac{1}{4}}$$

เมื่อ $T = 190$ เคลวิน

$$= \left(\frac{9}{6.0057 \times 10^{29}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$= 6.2219 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด ($W_{\text{hop,Mott}}$)

$$\text{โดยที่ } W_{\text{hop,mott}} = \frac{3}{4\pi R_{\text{hop,mott}}^3 N(E_F)} \quad (4.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{3}{4\pi(6.2219 \times 10^{-8})^3 (6.1584 \times 10^{22})} = \frac{3}{1.8640 \times 10^2}$$

$$= 1.6094 \times 10^{-2} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R_{hop,Mott} = (2.3678 \times 10^7)(6.2219 \times 10^{-8})$$

$$\alpha R_{hop,Mott} = 1.4732$$

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{2.3678 \times 10^7} = 4.2233 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}$$

และ

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

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C1} = \frac{e^2 N_d^{\frac{2}{3}} \xi_{Mott}}{k_B (4\pi\epsilon_s)} \quad (4.38)$$

$$T_{C1} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.2384 \times 10^{19})^{\frac{2}{3}} (4.2233 \times 10^{-8})}{(1.38 \times 10^{-23})(4\pi)(9.425 \times 10^{-13})} = \frac{1.3102 \times 10^{-32}}{1.634 \times 10^{-34}}$$

$$= 80.1836 \text{ เคลวิน}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.39)$$

$$= \frac{1}{4} \left(\frac{4.4986 \times 10^4}{190} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 3.8468$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอดด์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x=0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยยะประชิดเมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm) (10^3)	$T_{0,Mott}$ (K) (10^4)	$N_0(E_F)$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$) (10^{22})	T_{C1} (K)	$W_{hop,Mott}$ (meV)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$
190-80	15.50	37.55	2.35	26.84	16.30	20.71	3.94

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของเอพอส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right] \quad (4.40)$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES} \quad (4.41)$$

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

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s} \quad (4.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s} \quad (4.43)$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(1.5918 \times 10^2)(9.425 \times 10^{-13})}$$

$$\xi_{ES} = 3.4622 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของสมการดังกล่าวข้างต้น

$$T_{0,ES} = (-12.6166)^2 = 159.18 \text{ เคลวิน}$$

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} สามารถหาได้จากสมการที่ (4.43) ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.44)$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{65} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = 0.3912$$

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

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.45)$$

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

$$= \frac{1}{2} \frac{(1.38 \times 10^{-23})}{(1.6 \times 10^{-19})} (65) \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{65} \right)^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}} \quad (4.46)$$

หรือ

$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \Delta_C &= k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2} \\ &= (1.38 \times 10^{-23}) \left(\frac{1.5918 \times 10^2}{4.4986 \times 10^4} \right)^{1/2} \\ &= \frac{8.2089 \times 10^{-25}}{1.6 \times 10^{-19}} = 5.1306 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

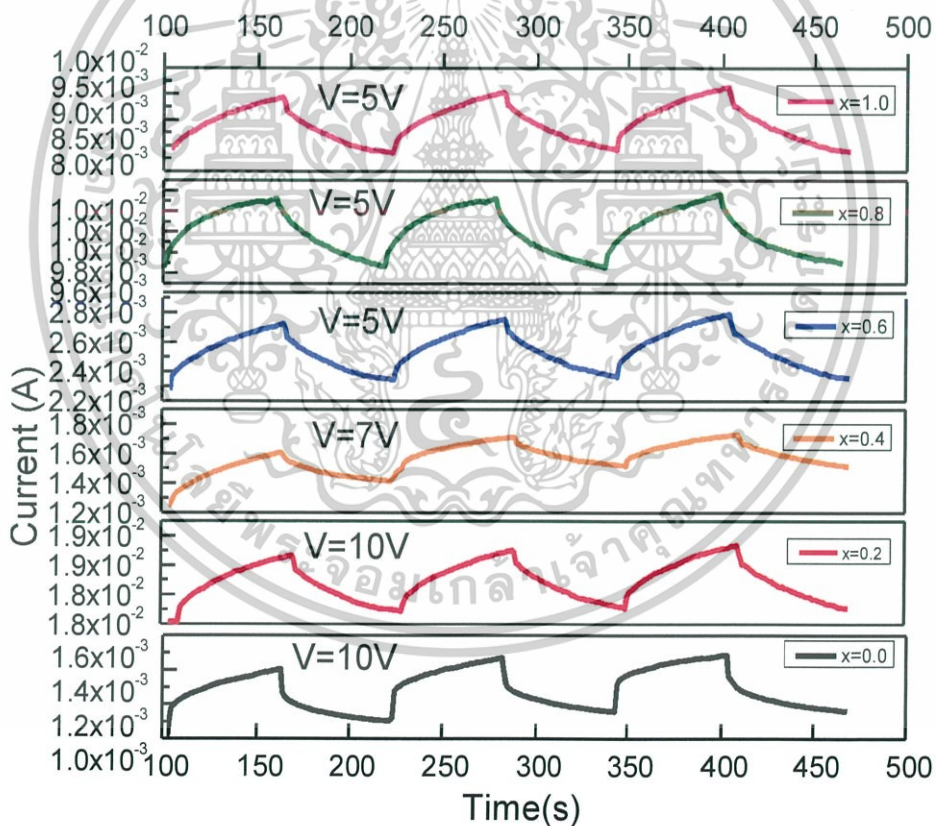
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระบะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($x = 0.6$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระบะประชิดเมื่อใช้เวลากการระเหิด 10 นาที

Temperature Range (K)	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm^{-1}) (10^3)	$T_{0,ES}$ (K)	ξ_{ES} (nm)	T_{C2} (K)	$W_{hop,ES}$ (meV)	Δ_C ($10^{-6} eV$)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$
105-50	11.32	342.84	160.75	39.68	8.18	7.75	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสโฟโตชาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งเรียกว่า กระแสโฟโตชาลง ซึ่งจากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อนของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าช่วงเวลาตอบสนองสั้นมากที่ช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยเวลาชาขึ้นสามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉาย ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่วงกระแสไฟฟ้าจะขึ้นไปตามสมการ

$$I = I_0 e^{-t/\tau_a} \quad (4.48)$$

จากการศึกษาพบว่าเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

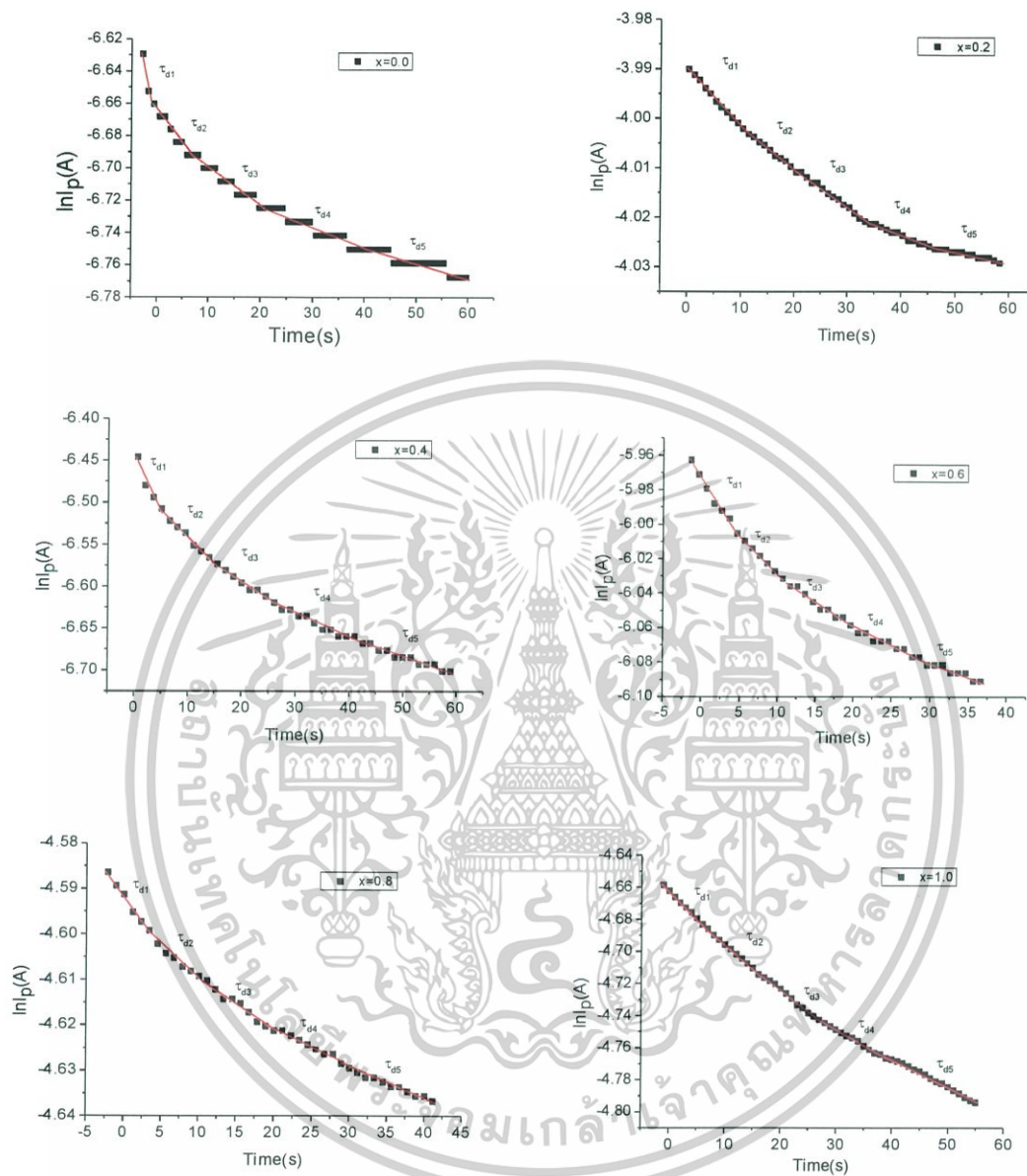
$$I = \sum_2^n A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{dn})] + A_n [\exp((-t/\tau_{dn})^\beta)] \quad (4.49)$$

และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกับดักประจุได้จากสมการ

$$\sigma_t = \frac{I_n}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (4.50)$$

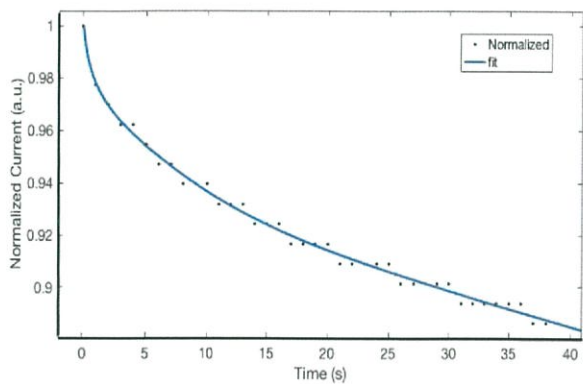
และผลการทดลองของกระแสไฟฟ้าขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวร้อนที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

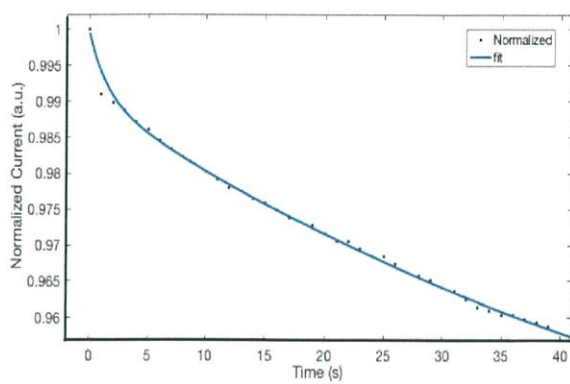


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

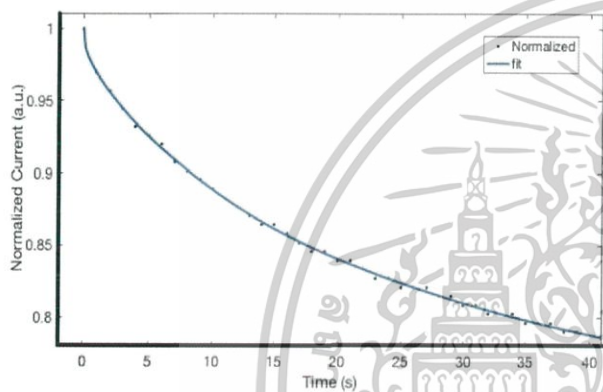
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



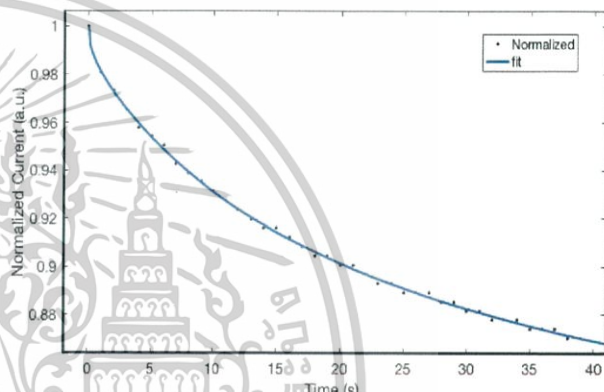
X=0.0



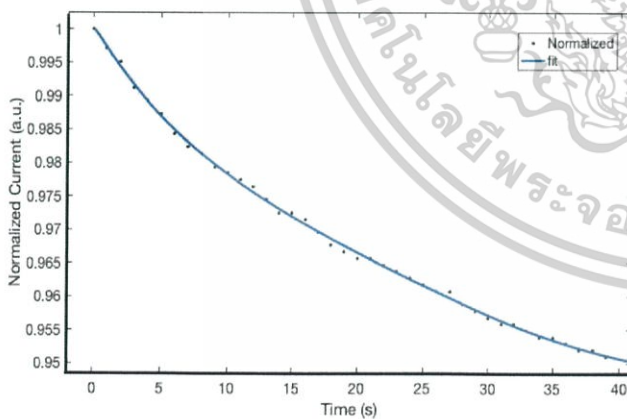
X=0.2



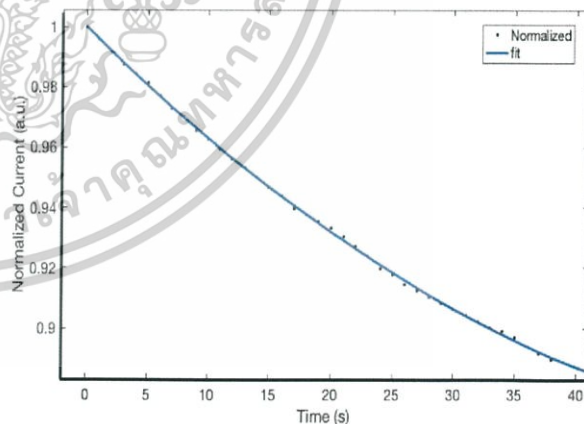
X=0.4



X=0.6



X=0.8



X=1.0

รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มอโลซ์ขาลง กับเวลา ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 0.8

และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี ระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงดีอาร์ัน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลา ในการระเหิดสารเคมี 10 นาที ระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Decay Component				
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term
0.0	$\tau_{d1} = 64.977$ $A_1 = 0.1654$	$\tau_{d2} = 196.078$ $A_2 = 0.002$	$\tau_{d3} = 393.70$ $A_3 = 38.54$	$\tau_{d4} = 645.161$ $A_4 = -86.81$	$\tau_{d5} = 1003.582$ $A_5 = 4.51$ $\beta = -0.2563$
	$\sigma_1 = 1.986 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.5677 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_2 = 1.3695 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.0811 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_3 = 2.4185 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.9091 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_4 = 2.0229 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.5968 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_5 = 1.8127 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.4309 \times 10^{-3} \text{ A}$
0.2	$\tau_{d1} = 819.67$ $A_1 = -0.0391$	$\tau_{d2} = 1211.78$ $A_2 = 2.346 \times 10^{-3}$	$\tau_{d3} = 1200.76$ $A_3 = 0.0478$	$\tau_{d4} = 2244.65$ $A_4 = -0.0091$	$\tau_{d5} = 4213.82$ $A_5 = 0.0825$ $\beta = 0.4459$
	$\sigma_1 = 3.2834 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 2.2695 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_2 = 3.0617 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 2.1163 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_3 = 3.0678 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 2.1205 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_4 = 2.8395 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.9627 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_5 = 2.7174 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.8783 \times 10^{-2} \text{ A}$
0.4	$\tau_{d1} = 67.93$ $A_1 = 0.0163$	$\tau_{d2} = 159.74$ $A_2 = 1.139 \times 10^{-3}$	$\tau_{d3} = 253.16$ $A_3 = 0.1188$	$\tau_{d4} = 383.14$ $A_4 = -0.5425$	$\tau_{d5} = 543.56$ $A_5 = 0.9615$ $\beta = 0.8694$
	$\sigma_1 = 4.2133 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.7413 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_2 = 3.8477 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.5902 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_3 = 2.5725 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.0632 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_4 = 5.4350 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 2.2462 \times 10^{-1} \text{ A}$	$\sigma_5 = 4.7146 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.9484 \times 10^{-3} \text{ A}$
0.6	$\tau_{d1} = 155.279$ $A_1 = 0.0161$	$\tau_{d2} = 243.902$ $A_2 = 2.027 \times 10^{-5}$	$\tau_{d3} = 359.712$ $A_3 = 0.0432$	$\tau_{d4} = 574.712$ $A_4 = 0.0913$	$\tau_{d5} = 653.594$ $A_5 = 0.0557$ $\beta = 0.2944$
	$\sigma_1 = 1.5968 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 7.2852 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_2 = 3.9652 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.8091 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_3 = 3.1483 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.4364 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_4 = 2.6006 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.1865 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_5 = 2.4940 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.1378 \times 10^{-3} \text{ A}$
0.8	$\tau_{d1} = 362.31$ $A_1 = 0.1015$	$\tau_{d2} = 625.00$ $A_2 = 3.521 \times 10^{-3}$	$\tau_{d3} = 724.63$ $A_3 = -0.2341$	$\tau_{d4} = 1111.55$ $A_4 = 1.636$	$\tau_{d5} = 1446.98$ $A_5 = -1.881$ $\beta = 0.9746$
	$\sigma_1 = 3.6783 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.5908 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_2 = 3.0359 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.3130 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_3 = 2.9240 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.2646 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_4 = 2.6817 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.1598 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_5 = 2.5740 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.1132 \times 10^{-2} \text{ A}$
1.0	$\tau_{d1} = 261.78$ $A_1 = -0.1001$	$\tau_{d2} = 313.47$ $A_2 = 1.121 \times 10^{-5}$	$\tau_{d3} = 381.67$ $A_3 = 0.2007$	$\tau_{d4} = 552.48$ $A_4 = -0.987$	$\tau_{d5} = 456.62$ $A_5 = 1.448$ $\beta = 0.9195$
	$\sigma_1 = 7.2200 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.7900 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_2 = 6.4778 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.6060 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_3 = 5.8228 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.4436 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_4 = 4.9689 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.2319 \times 10^{-2} \text{ A}$	$\sigma_5 = 5.3787 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.3335 \times 10^{-2} \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลพร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้มและมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 31.999 องศา ตรงกับระนาบผลึก (400) สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลพีคของระนาบ (400) เลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เล็กลง และความเข้มของพีคมีแนวโน้มลดลงด้วย และในกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnSe พีคของระนาบ (400) จะปรากฏที่มุม 2θ เท่ากับ 30.990 องศา ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ประพฤติตัวเป็นสารละลายของแข็งที่สมบูรณ์ (completed solid solution) ตลอดช่วงของค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ Se โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึก a, b และ c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับกฎของวีการ์ต (Vegard's law) เนื่องจากรัศมีของ Se^{2-} ($r=1.98 \text{ \AA}$) มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของ S^{2-} ($r=1.84 \text{ \AA}$)

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ แสดงขอบของเกรนอย่างคมชัด เกรนมีลักษณะเป็นแผ่นแบนๆ รูปลิ่มเหลี่ยมผืนผ้าซึ่งความหนาไม่ค่าใกล้เคียงกัน แต่ความยาวจะแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ $x = 0.6$ แต่เมื่อ $x = 0.8$ ลักษณะของเกรนจะมีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมจัตุรัส และขนาดของเกรนจะโตมากขึ้นอีกเมื่อ $x = 1.0$ ข้อสังเกตคือเมื่อ $x = 1.0$ เกรนรูปร่างเป็นแผ่นแบนๆ โดยส่วนใหญ่จะขนานกับผิวหน้าของกระจกสไลด์ แต่เกรนบางส่วนจะเกาะกลุ่มกันเป็นคลัสเตอร์และจัดเรียงไม่

ระนาบอยู่ในแนวตั้งเมื่อเทียบกับผิวกระจกสไลด์ อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) ของฟิล์มบางที่ $x = 1.0$ มีค่าต่ำสุด แสดงว่าคลัสเตอร์เหล่านี้มีอิทธิพลมากกว่าเกรนที่มีระนาบขนานกับผิวหน้าของกระจกสไลด์ เนื่องจากระนาบของคลัสเตอร์จะไปลดทอนค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) ให้ลดลง ส่วนเกรนที่ขนานกับผิวหน้ากระจกสไลด์จะส่งเสริมให้ค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (400) มีค่าเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) โดยมีค่าลดลงจาก 1.18 เป็น 0.95 อิเล็กตรอนโวลต์ อีกทั้งยังพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnSe มีค่าช่องว่างแถบเป็นแบบเฉียง (indirect band gap) อีกด้วย จำนวน 2 ค่าคือ 0.80 และ 0.92 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง $10^{-1} - 10^{-2}$ โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.2×10^{-2} โอห์ม-เซนติเมตรที่ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (X) เท่ากับ 1.0

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มที่แปรผกผันกัน โดยที่ค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสภาพคล่องของพาหะมีแนวโน้มลดลงและชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{SnS}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เป็นชนิดพี (p-type) ทั้งหมดซึ่งมีสาเหตุมาจากแวกแคนซีของอะตอม Sn

จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้รับที่อยู่ติดกันด้วยความสัมพันธ์

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

พลังงานความร้อนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับพลังงานผู้รับ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนในระดับพลังงานผู้รับเหล่านี้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 190-80 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บางส่วนและใช้ภายใต้การที่วารสารศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด สำหรับกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่จะเกิดการกระโดดไปมาในบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่กัณฑ์ภาวะที่อยู่ในเนื้อเกรน กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 60-25 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพโรส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูโลมบ์ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และช่องว่างของคูโลมบ์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำความสะอาดกล่องกราไฟต์ให้สะอาดโดยการเช็ดด้วยอะซิโตนและทำให้แห้งโดยการอบด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
2. ขณะนำกล่องกราไฟต์ที่บรรจุผงผลึกของสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดต้องทำอย่างช้าๆ ระวังไม่ให้กล่องกราไฟต์พลิกคว่ำ ซึ่งจะส่งผลให้แผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์เป็นผงผลึกสารตั้งต้น แล้วจะทำให้เคลือบฟิล์มบางไม่ติด
3. การเพิ่มอุณหภูมิให้กับกล่องกราไฟต์จนถึงอุณหภูมิของการระเหิดสารเคมี ควรใช้เวลาสั้นๆ ไม่เกิน 20 นาที ส่วนการลดอุณหภูมิของกล่องกราไฟต์หลังเสร็จสิ้นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางควรทำอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ฟิล์มบางลอกออกจากแผ่นฐานรองรับ
4. ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางทุกครั้งต้องทำความสะอาดขั้วหลอดไฟฮาโลเจนโดยการขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อลดคราบสนิมของขั้วไฟฟ้า
5. ต้องสวมแว่นตาป้องกันแสงสว่างจ้าจากหลอดฮาโลเจนขณะเคลือบฟิล์มบาง รวมทั้งต้องเปิดพัดลมดูดควันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

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

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

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิบัติจากออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสปีดเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ, 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ, 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระบะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

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

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

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

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี ออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Banai, R.E., Lee, H., Motyka, M.A. and Hom, M.W. 2013. "Optical Properties of Sputtered SnS Thin Films for Photovoltaic Absorbers" *IEEE J. Photovoltaics*. 3(3): 1084-1089.

Bashkirov, S.A. Gremenok, V.F., Ivanov, V.A. 2011. "Physical Properties of SnS Thin Films Fabricated by Hot Wall Deposition" *Semiconductors*. 45 (6) : 749-752

Bletskan, D.I., 2005. Phase Equilibrium in Binary Systems $\text{A}^{\text{M}}\text{B}^{\text{VI}}$. *J. Ovonic Res.* 1(5):61-69

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". *Thin Solid Films*. 520: 837-841.

Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-ray Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company Inc. : pp 9-14.

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Dieter K.S. 1998. **Semiconductor Material and Device Characterization**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons Inc.

Elangovan E. and Ramamurthi K. 2003. "Optoelectronic Properties of Spray Deposition SnO₂:F Thin Film For Windows Materials in Solar Cell." *J. Optoelect. Adv. Mat.* 5 : 45-54.

Fahrenbruch A.L. and Bube R.H. 1983. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion**. New York : Academic Press Inc. : 44.

Gao, C., Shen, H. and Sun, L. 2011. "Preparation and Properties of Zincblende and Orthorombic SnS Films by Chemical Bath Deposition". *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". *Mater. Lett.* 65: 1413-1415.

Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors". *Appl. Phys. Lett.* 97, 143510-1- 143510-3.

Ghosh, B., Bhattacharjee, R., Banerjee, P. and Subrata Das S., 2011. "Structural and Optoelectronic Properties of Vacuum Evaporated SnS Thin Films Annealed in Argon Ambient". *Applied Surf Sci.* 257:3670-3676.

Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction". *App. Phys. Lett.* 90: 243106-1- 243106-3.

Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D. 2015. "Solar Cell Efficiency Tables (Version 45)". *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". *Appl. Phys. Lett.* 87: 243512-1- 243512-3.

Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers". *Appl. Phys. Lett.* 102: 072103-1-

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกหรือการนำ
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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". *Appl. Phys. Lett.* 99: 113301-1-113301-3.

Jackson, P., Hariskos, D., Lotter, E., Paetel, S., Wuerz, R., Manner, R., Wischmann, W. and Powalla, M. 2011. "New World Record Efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films Solar Cells Beyond 20 %". *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 19: 894-897.

Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. "Optical and Electrical Properties of Cu₂ZnSnS₄ Film Prepared by Sulfurization Method". *J. Elec. Matter.* 41(8): 2204-2209.

Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN". *Appl. Phys. Lett.* 68(13): 1808-1810.

Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc.

Kittel C. 2005. *Introduction to Solid State Physics* 8th Edition. United States of America: John Wiley & Sons Inc.

Klochko, N.P., Momotenko, O.V., Tyukhov, I.I., Volkova, N.D., Kopach, V.R., Khrypunov, G.S., Lyubov, V.M. and Kirichenko, M.V. 2015. "Structure and Properties of SnS Thin Layers Obtained by Sulfurization of Electro-Deposited Tin Precursors". *Solar Energy.* 118: 117-125.

Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. "Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si". *Appl. Phys. Lett.* 100: 153509-1- 153509-4.

Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. "Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes". *Appl. Phys. Lett.* 102: 193511- 1193511-3.

Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis". *J. Appl. Phys.* 113: 153709-1-153709-8.

Miles, R.W., Ogah, E.O., Guillaume Zoppi, Forbes, I. 2009. "Thermally Evaporated Thin Films of SnS for Application in Solar Cell Devices". *Thin Solid Films.* 517:4702-4705.

Moller, H.J. "Semiconductors for Solar Cells", Artech House, Inc. 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Patel, M., Muhhopadhyay, I. and Ray, A. 2013. "Annealing Influence Over Structural and Optical Properties of Sprayed SnS Thin Films". *Optical Materials*. 35: 1693-1699.
- Reddy, V.R.M., Gedi, S., Park, C., Miles, R.W. and Ramakrishna Reddy, K.T. 2015. "Development of Sulphurized SnS Thin Films Solar Cells". *Curr. Appl. Phys.* 15: 588-598.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules". *Chin. Phys. B*. 21(3): 038104-1- 038140-7.
- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*. 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill.
- Shi, C., Yang, P., Yao, M. and Chen, Z. 2013. "Preparation SnS₂ Thin Films by Close Spaced Sublimation at Different Source Temperatures". *Thin Solid Films*. 534: 28-31.
- Sinsermsuksakul, P. L., Sun, P.L., Lee, S.W., Park, H.H., Kim, S.B., Yang, C. and Gordon, R.G. 2014. "Overcoming Efficiency Limitations of SnS-Based Solar Cells". *Adv. Energy Mater.* 4: 14004961-1400491-7.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution". *J. Appl. Phys.* 83(4): 2104-2111.
- Van der Pawn L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Repts.* 13 : 1-9.
- Xu, J. and Yang, Y. 2014. "Study of the Performances of SnS Heterojunction by Numerical Analysis". *Energy Conversion and Management*. 78: 260-265.
- Yanuar, H., Guastivino, F., Llinares, C., Djessas, K. and Masse, G. 2000. "SnS Thin Films Grown by Close Spaced Vapor Transport". *J. Mater. Sci. Lett.* 19: 2135-2137.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.73-1859

Pattern : 73-1859		Radiation : 1.540600		Quality : Calculated							
Sn S		2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Tin Sulfide		15.841	<1	2	0	0	*84.664	8	2	2	3
		22.001	32	1	0	1	84.935	5	8	0	3
		26.013	66	2	0	1	86.352	3	8	1	2
		27.479	71	2	1	0	*86.352	3	1	3	2
		30.477	53	0	1	1	87.406	2	3	2	3
		31.533	100	1	1	1	87.986	<1	2	3	2
		31.655	63	3	0	1	88.300	1	8	2	1
		31.995	68	4	0	0	88.526	3	5	3	1
		34.527	<1	2	1	1	89.230	<1	6	1	3
		38.301	1	4	0	1					
		39.069	42	3	1	1					
		39.354	6	4	1	0					
		41.695	2	0	0	2					
		42.566	19	1	0	2					
		44.771	30	4	1	1					
		44.869	17	2	0	2					
		45.522	25	0	2	0					
		45.628	23	5	0	1					
		48.520	24	2	2	0					
		48.520	24	1	1	2					
		48.605	22	3	0	2					
		50.693	1	2	1	2					
		51.141	6	1	2	1					
		51.357	18	5	1	1					
		53.178	15	2	2	1					
		53.496	9	4	0	2					
		53.496	9	4	0	2					
		54.097	10	2	1	1					
		54.313	12	6	1	0					
		56.505	2	0	2	2					
		56.721	20	4	2	0					
		58.671	1	6	1	1					
		58.671	1	4	1	2					
		59.380	4	5	0	2					
		60.952	<1	4	2	1					
		61.871	<1	7	0	1					
		63.428	1	0	2	2					
		64.034	9	1	2	2					
		64.247	14	5	1	2					
		65.129	3	1	0	3					
		65.836	<1	2	2	2					
		66.115	1	6	0	2					
		66.425	5	6	2	1					
		66.834	7	7	1	1					
		66.899	7	8	0	0					
		66.899	7	2	0	3					
		68.784	8	3	2	2					
		69.972	5	6	2	0					
		69.192	5	0	1	3					
		69.841	2	1	1	3					
		69.841	2	3	0	3					
		70.790	<1	6	1	2					
		70.790	<1	8	0	1					
		71.487	2	8	1	0					
		71.487	2	2	1	3					
		72.812	5	6	2	1					
		72.812	5	4	2	2					
		73.235	3	2	3	0					
		73.652	4	7	0	2					
		73.849	2	4	0	3					
		74.349	2	3	1	3					
		74.746	3	0	3	1					
		75.310	8	8	1	1					
		*75.310	8	1	3	1					
		76.990	<1	2	3	1					
		77.880	3	5	2	2					
		78.075	3	7	1	2					
		78.269	6	4	1	3					
		78.889	1	5	0	3					
		79.768	3	3	3	1					
		79.950	2	4	3	0					
		80.350	2	9	0	1					
		82.006	<1	8	0	2					
		83.038	2	1	2	3					
		83.231	1	5	1	3					
		83.616	3	4	3	1					
		83.942	2	6	2	2					
		84.664	8	8	2	0					
Lattice : Orthorhombic S.G. : Pnma (62) a = 11.18000 b = 3.98200 c = 4.32900 a/b = 2.80763 c/b = 1.08714 Z = 4 Mol. weight = 180.75 Volume [CB] = 192.72 Dx = 5.196 U/cor = 4.54 ICSD COLLECTION CODE : 024376 TEMPERATURE FACTOR : ATF REMARKS FROM ICSD : PICT.											
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings									
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 37, page 1903, (1981) : del Bucchia, S., Jumas, J.C., Maurin, M.											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnSe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.32-1382

Pattern : 32-1382		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Sn Se		2th	l	h	k	i
Tin Selenide		15.506	2	2	0	0
		21.378	5	1	0	1
		25.318	16	2	0	1
		26.379	9	2	1	0
		29.219	17	0	1	1
		30.283	100	1	1	1
		31.317	47	4	0	0
		37.735	33	3	1	1
		38.101	4	4	1	0
		40.435	9	0	0	2
		41.246	9	1	0	2
		43.146	18	0	2	0
		43.341	13	4	1	1
		44.631	3	5	0	1
		46.789	7	1	1	2
		47.202	5	3	0	2
		47.728	1	6	0	0
		48.652	1	1	2	1
		48.907	1	2	1	2
		49.816	22	5	1	1
		50.680	4	2	2	1
		52.000	7	4	0	2
		52.259	5	3	1	2
		52.781	2	6	1	0
		54.260	14	4	2	0
		56.760	1	4	1	2
		57.740	2	5	0	2
		60.599	4	0	2	2
		61.202	4	1	2	2
		62.199	3	5	1	2
		62.998	1	1	0	3
		63.741	2	9	2	1
		64.298	1	6	0	2
		64.739	4	2	9	3
		65.320	3	8	0	0
		65.861	3	3	2	2
		66.819	1	6	2	0
		66.720	4	0	1	3
		67.302	1	1	1	3
		67.622	1	3	0	3
		69.518	1	8	1	0
		69.802	4	4	2	2
		70.520	1	0	3	1
		71.160	5	1	3	1
		71.603	1	7	0	2
		73.119	1	8	1	1
		74.720	2	5	2	2
		75.522	7	3	3	1
		78.283	1	9	0	1
		79.259	1	4	3	1
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 197.65				
S.G. : Pnma (62)		Volume [CD] = 213.41				
a = 11.42000		Dx = 6.152				
b = 4.19000		Z = 4				
c = 4.46000		Mc = 7.32				
a/b = 2.72554						
c/b = 1.06444						
ADDITIONAL PATTERN To replace 14-159						
*ICDD Grant-in-Aid, primary reference : Calvert, L., National Research Council of Canada, Ottawa, Canada. *Kristallografiya, volume 24, page 674, (1979) unit cell data. Avilov, A. et al.						
Radiation : CuKα		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54188		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM : F30= 95(0.0079,40)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล

นางสาวปาริชาติ คำหมอน

วัน เดือน ปีเกิด

วันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2539

ภูมิลำเนา

จังหวัดร้อยเอ็ด

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา โรงเรียนคลองหนองใหญ่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับมัธยม โรงเรียนวัดอินทาราม จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้