

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแอนติโมนีซัลไฟด์ซึ่งเตรียมโดยวิธี
ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF ANTIMONY SULFIDE THIN
FILMS PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION
METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF ANTIMONY SULFIDE THIN
FILMS PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION
METHOD



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด

Characterization of Sb_2S_3 Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method

ชื่อนักศึกษา นางสาวรินพร อำนวยสถิตมันท์ รหัสนักศึกษา 58051136

นางสาวอัญญา แสนคำ รหัสนักศึกษา 58051177


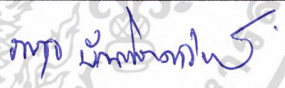

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2561

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|----------------------------|--|
| รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ | |
| ประธานกรรมการ |  |
| อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ |  |
| กรรมการ | |
| รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง | |
| กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาววรินพร อำนวยสถิตมัน รหัสนักศึกษา 58051136 นางสาวอัญญา แสนคำ รหัสนักศึกษา 58051177 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) |
| ปีการศึกษา | 2561 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง |

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง Sb_2S_3 เคลือบลงแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึก ลักษณะพื้นผิว และองค์ประกอบของฟิล์มบางโดยวิธี XRD SEM และ EDS ตามลำดับ พบว่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงจะมีค่าเท่ากับ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้สามารถหาได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและสเปกตรัมการสะท้อนแสง ในช่วง 600-1400 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ค่าพารามิเตอร์ทางแสงจำนวนมากสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองเวมเฟิล-ไดโตนินิโค, แบบจำลองเซลไมเออร์และแบบจำลองสปิตเตอร์-แพน สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ในช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 280เคลวิน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิในช่วง 80 ถึง 185 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยยะไม่คงที่ของมอดต์ ส่วนสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 65 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองกลไกการกระโดดของเอฟโรส-ชลอฟสกี

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง Sb_2S_3 วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหาและการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---------------|--|
| Title | Characterization of Sb_2S_3 Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method |
| Student | Miss.Varinporn Amnajsthitman Student ID 58051136 Miss.Aunchana Saenkham Student ID 58051177 |
| Degree | Bachelor of Science (Applied Physics) |
| Department | Physics |
| Faculty | Science |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) |
| Academic Year | 2018 |
| Advisor | Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang |

Abstract

In this special project, Sb_2S_3 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. For all obtained films, the direct band gap of Sb_2S_3 thin films determined from the transmission spectra is equal to 1.5 eV. The n and k values of films were determined by using transmittance and reflectance spectra in the spectra range 600 - 1400 nm. In transparent region, the spectral dependences of refractive index were interpreted in the frame of a single oscillator model. The Wemple-Didomenico, Sellmeier and Spitzer-Fan models were employed to evaluate the various optical parameter of the films. The temperature dependence of electrical conductivity in Sb_2S_3 thin films between 220 and 280 K was interpreted in terms of Seto model. The conductivity at temperature between 80 - 185 K was explained by Mott - VRH model. The conductivity at low temperature (< 65 K) is well described by ES - VRH model.

Keywords : Sb_2S_3 thin films, Close spaced sublimation method, Optical properties , Electrical properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ และ อาจารย์ภารุจ บัณฑิตธาตาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา และให้ความรู้ ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน และคอยช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นายมนตรี หาญโกย นางสาวปาริชาติ คำหมอน นักศึกษาปริญญาโท และ นักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ติดต่อมา

วรินพร อำนางสถิตมัน

อัญชญา แสนคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน..... | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก..... | 6 |
| 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ..... | 6 |
| 2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก..... | 9 |
| 2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแอนติโมนีไดซัลไฟด์..... | 11 |
| 2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก..... | 11 |
| 2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด..... | 12 |
| 2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น..... | 12 |
| 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์..... | 14 |
| 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 15 |
| 2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ..... | 16 |
| 2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน..... | 17 |
| 2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง..... | 19 |
| 2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ..... | 21 |
| 2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง..... | 21 |
| 2.5 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง..... | 24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ซ้ำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.5.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง..... | 29 |
| 2.5.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง..... | 32 |
| 2.5.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข..... | 32 |
| 2.6 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว..... | 33 |
| 2.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสเปกโทรสโกปี..... | 41 |
| 2.7.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์..... | 41 |
| 2.8 สภาพนำไฟฟ้า..... | 46 |
| 2.9 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า..... | 46 |
| 2.9.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง..... | 47 |
| 2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิคแวนเดอร์เพาว์..... | 48 |
| 2.10 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 50 |
| 2.10.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง..... | 51 |
| 2.10.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง..... | 53 |
| 2.10.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่..... | 55 |
| 2.11 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอาร์..... | 58 |
| 2.11.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตฮาลลง..... | 65 |
| 2.11.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตฮาลขึ้น..... | 67 |
| 2.12 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 68 |
| 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 70 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 73 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย..... | 73 |
| 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้ เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐาน รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 73 |
| 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียม | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส่วโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนำไปใช้ประโยชน์ที่ 73 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค..... | 74 |
| 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค..... | 74 |
| 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง..... | 74 |
| 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้า..... | 74 |
| 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 75 |
| 3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ..... | 75 |
| 3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิด..... | 75 |
| 3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์..... | 75 |
| 3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่ เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 76 |
| 3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 78 |
| 3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค..... | 78 |
| 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค..... | 78 |
| 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง..... | 78 |
| 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า..... | 78 |
| 3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว..... | 79 |
| 3.3.4.2 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดอิมพีแดนซ์..... | 79 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... | 80 |
| 4.1 สันฐานวิทยาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 80 |
| 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่ บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 81 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2.1 ผลการึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 81 |
| 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 87 |
| 4.2.3 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 89 |
| 4.3 ผลการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 96 |
| 4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 97 |
| 4.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 97 |
| 4.4.2 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 101 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.4.3 การหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิด..... | 102 |
| 4.4.4 การหาค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิด..... | 104 |
| 4.4.5 การหาค่าฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 106 |
| 4.4.6 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดโดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว..... | 109 |
| 4.4.7 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดโดยอาศัยแบบจำลองเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์..... | 112 |
| 4.4.8 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดโดยอาศัยแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน..... | 114 |
| 4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 118 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.5.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด..... | 118 |
| 4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 2 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด..... | 128 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 134 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 134 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 138 |
| เอกสารอ้างอิง | |
| ภาคผนวก | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

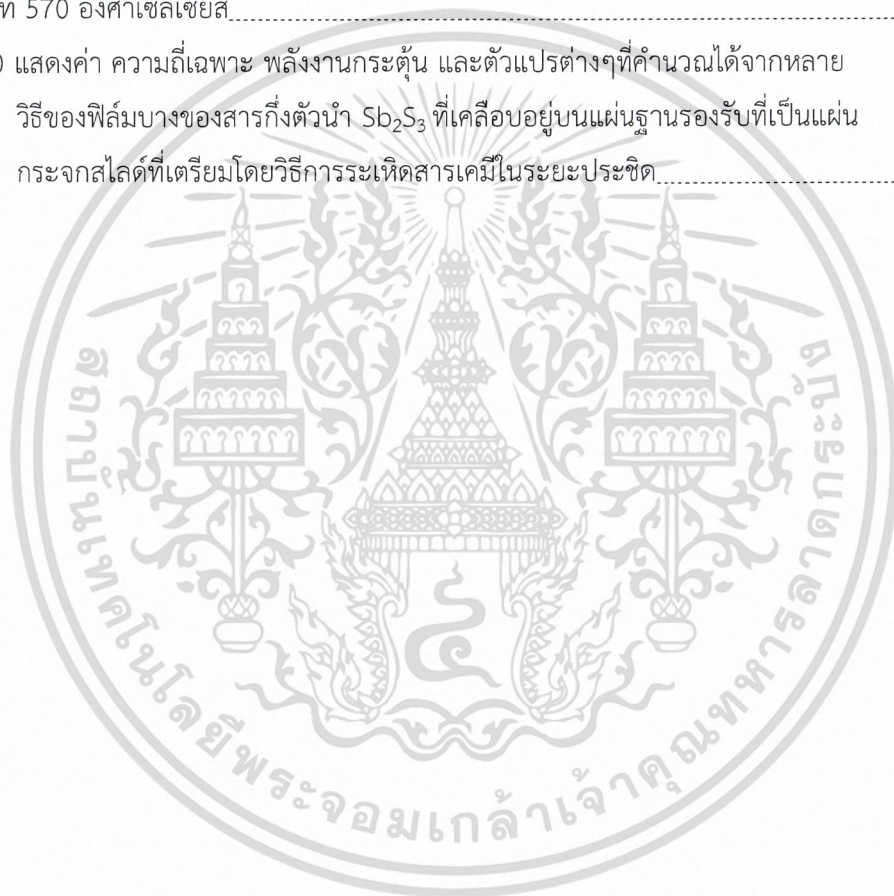
สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ..... | 7 |
| 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ..... | 8 |
| 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)..... | 10 |
| 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 88 |
| 4.2 แสดงค่าคงที่โครมฟลักของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐาน รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 90 |
| 4.3 แสดงขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐาน รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 95 |
| 4.4 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 100 |
| 4.5 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่ความยาวคลื่น 1250 nm..... | 108 |
| 4.6 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 โดยอาศัยแบบจำ ลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวแบบจำลองเซลไมเออร์และแบบจำลองสปิตเซอร์-แพน..... | 117 |
| 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณจากแบบจำลองของซีโตของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที ที่ 570 องศาเซลเซียส..... | 122 |
| 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ ของมอดต์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลากการระเหิด 25 นาที ที่ 570 องศาเซลเซียส..... | 125 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะ ไม่คงที่ของเอพโรสซอลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่ บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธี การระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลากการระเหิด 25 นาที ที่ 570 องศาเซลเซียส..... | 128 |
| 4.10 แสดงค่า ความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลาย วิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด..... | 136 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ..... | 6 |
| 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก..... | 10 |
| 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแอนติโมนีไดซัลไฟด์..... | 11 |
| 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ..... | 13 |
| 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู..... | 13 |
| 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน..... | 14 |
| 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์..... | 15 |
| 2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 16 |
| 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ..... | 17 |
| 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)..... | 19 |
| 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)..... | 19 |
| 2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง..... | 20 |
| 2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน..... | 22 |
| 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ..... | 24 |
| 2.15 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์ม บางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางโปร่งแสง..... | 25 |
| 2.16 แสดงรีจัวร์แทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ α -Si : H ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์..... | 26 |
| 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของ สารประกอบ NaF..... | 36 |
| 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสาร ประกอบ $Ba_2NaNb_5O_{15}$ | 37 |
| 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ Cds..... | 37 |

สารบัญญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.20 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง..... | 47 |
| 2.21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่น และสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์..... | 48 |
| 2.22 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิคแวนเดอร์เพาว์..... | 49 |
| 2.23 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน..... | 51 |
| 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความ สัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ | 55 |
| 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$ | 55 |
| 2.26 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{e}) และ กักตักพาหะ ชนิดจับโฮล (E_{h}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและ จุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ..... | 59 |
| 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโต ขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ौरัน..... | 62 |
| 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ที่ौरันทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง..... | 63 |
| 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความ หนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง..... | 66 |
| 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ I เพื่อใช้คำนวณหาค่าความ หนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น..... | 67 |
| 2.31 แสดงสเปกตรัม EDX ของฟิล์มบางติบุกซ์ไพล์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของ แผ่นฐานรองรับเท่ากับ580และ650องศาเซลเซียส..... | 71 |
| 2.32 แสดงรูปภาพที่ได้จาก XRD ของฟิล์มบางติบุกซ์ไพล์ที่อุณหภูมิ..... | 71 |
| 2.33 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ₂ ที่เตรียมได้ จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ580และ650องศาเซลเซียส..... | 72 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.34 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอนุกรมของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส..... | 72 |
| 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุกรมกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 77 |
| 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด..... | 77 |
| 4.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาทีที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส..... | 80 |
| 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 81 |
| 4.3 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อนุกรมสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส..... | 82 |
| 4.4 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อนุกรมสารตั้งต้นเท่ากับ 555 องศาเซลเซียส..... | 83 |
| 4.5 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อนุกรมสารตั้งต้นเท่ากับ 560 องศาเซลเซียส..... | 84 |
| 4.6 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อนุกรมสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส..... | 85 |
| 4.7 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อนุกรมสารตั้งต้นเท่ากับ 570 องศาเซลเซียส..... | 86 |
| 4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 89 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 89 |
| 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้าง a , b และ c กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 92 |
| 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 94 |
| 4.12 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที..... | 96 |
| 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 97 |
| 4.14 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 98 |
| 4.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 98 |
| 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส..... | 99 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 101 |
| 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 102 |
| 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 103 |
| 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 104 |
| 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 105 |
| 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจินตภาพของสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 105 |
| 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตรกับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 106 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิวกับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 107 |
| 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)/(n^2 - 2)$ กับ (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 107 |
| 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับพลังงานโฟตอน $(hu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 109 |
| 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับพลังงานโฟตอน $(hu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 112 |
| 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ $(\lambda)^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 113 |
| 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - k^2)$ กับ $(\lambda)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 114 |
| 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(-4\pi\chi_e)$ กับ $(\lambda)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศา | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 116 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที..... | 118 |
| 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาทีที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส..... | 119 |
| 4.33 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโต (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอพโรสซชลอฟสกี..... | 129 |
| 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 130 |
| 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 131 |
| 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียความเป็นฉนวนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 131 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 132 |
| 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 132 |
| 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{G}{\omega}$ กับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 133 |
| 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่า $\ln\left(\frac{\omega_0}{T}\right)$ กับ $\left(\frac{1000}{T}\right)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{G}{\omega}$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส..... | 133 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้มีความพยายามแสวงหาพลังงานใหม่มาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภท น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน พลังงานที่ประเทศต่างๆหันมาให้ความสนใจ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากแหล่งต้นกำเนิดพลังงานไม่มีค่าใช้จ่าย สาดส่องไปทุกที่และยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกราว 4 พันล้านปี เป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลพิษขณะใช้งานจึงไม่มีการปล่อยมลพิษและของเสีย จึงช่วยลดและหยุดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้จะไม่สร้างมลพิษทางอากาศแล้วยังไม่ก่อมลพิษทางเสียงอีกด้วย เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีสิ่งใดเคลื่อนไหวขณะใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการสึกหรอ ต้องการการดูแลรักษาน้อยมาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และยังให้ผลลัพธ์ระยะยาวคุ้มค่างับการลงทุนเนื่องจากอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานถึง 25-30 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุนเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานโดยรวมถึงผลกระทบที่อาจมีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้วถือว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานทดแทนประเภทอื่น เมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และที่สำคัญประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานได้เต็มวันที่มีเมฆมากโดยที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สัดส่วนกับความหนาแน่นของเมฆ การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะเช่นนี้ยังเป็นการเพิ่มศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศเพิ่มขึ้นไปอีก ความพยายามที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการบริโภคในชีวิตประจำวันนั้นนับว่าเป็นการมองหาความยั่งยืนในการใช้พลังงานและทางออกของปัญหาภาวะโลกร้อน การพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแรงผลักดันสำคัญที่จะนำประเทศไทยก้าวไปสู่ยุคแห่งพลังงานทดแทนและเป็นอิสระในการใช้พลังงานจากวิกฤติพลังงานที่ทั่วโลกกำลังประสบอยู่

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cell หรือ solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดแสงสว่างให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงทันทีที่มีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ตกกระทบที่ตรงบริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์

ตามปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และเป็นที่ยอมรับกันว่าฟิล์มบางของสารประกอบซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคจรีนได้อย่าง CdTe และ CuInGaSe₂ โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 16.5 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Green et al. 2015; Jackson et al. 2011) แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ In และ Ga ล้วนเป็นธาตุ ที่หายาก มีราคาแพง ส่วนธาตุ Cd เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้า ขนาดเทอร์วัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ยังเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีการ วิจัยเพื่อค้นคว้าหาวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่าเดิม สารกึ่งตัวนำ Sb₂S₃ เป็นหนึ่งในสารประกอบ ซาลโคจรีนที่มีความโดดเด่นเช่นเดียวกับ CdTe และ CuInGaSe₂ เนื่องจากธาตุแอนติโมนี และซัลเฟอร์หาได้ง่าย มีมากในธรรมชาติ ราคาไม่แพง สารประกอบ Sb₂S₃ มีเสถียรภาพสูง โครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1.5 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งขนาดของช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ช็อคเลย์และควอยส์ เซอร์ (Shockley-Queisser) ได้ทำนายไว้ว่าสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี ประสิทธิภาพสูงสุดได้ (Dhankhar et al., 2014) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb₂S₃ มี สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ (Cheng and Conibeer, 2011) และมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ซึ่งสามารถ นำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี การเตรียมฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ Sb₂S₃ ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถ เตรียมได้จากหลากหลายวิธี ทั้งวิธีทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) วิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าใน สารละลายเคมี วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง วิธีซัลเฟอร์ไอเซชันจากฟิล์มบางแอนติโมนี และวิธีระเหิด สารเคมีในระยะประชิด เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดใน ระบบสุญญากาศมีข้อดีหลายประการคือ อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางไม่มีความซับซ้อนมาก นัก สามารถประกอบและติดตั้งขึ้นมาใช้เองได้ ใช้ระดับสุญญากาศไม่ต่ำนัก ดังนั้นต้นทุน ค่อนข้างต่ำ เวลาที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางค่อนข้างสั้น เป็นการประหยัดเวลา ฟิล์มบางที่ เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอยึดติดแน่นกับแผ่นฐานรองได้ดี ควบคุมอัตราการเคลือบได้ ง่าย อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางไม่สูงนัก ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงน้อย ด้วยเหตุนี้จึงเป็น ที่น่าสนใจที่จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb₂S₃ โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะ ประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ Sb₂S₃ ให้เคลือบบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นจะทำการศึกษา โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ศึกษาสมบัติทางแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักพาหะซึ่งเป็นผลมาจากข้อบกพร่องผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 2) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้
- 3) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
- 4) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 5) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี
- 6) เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวินของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้
- 2) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้
- 4) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 6) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี
- 7) ศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3

1.4 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน

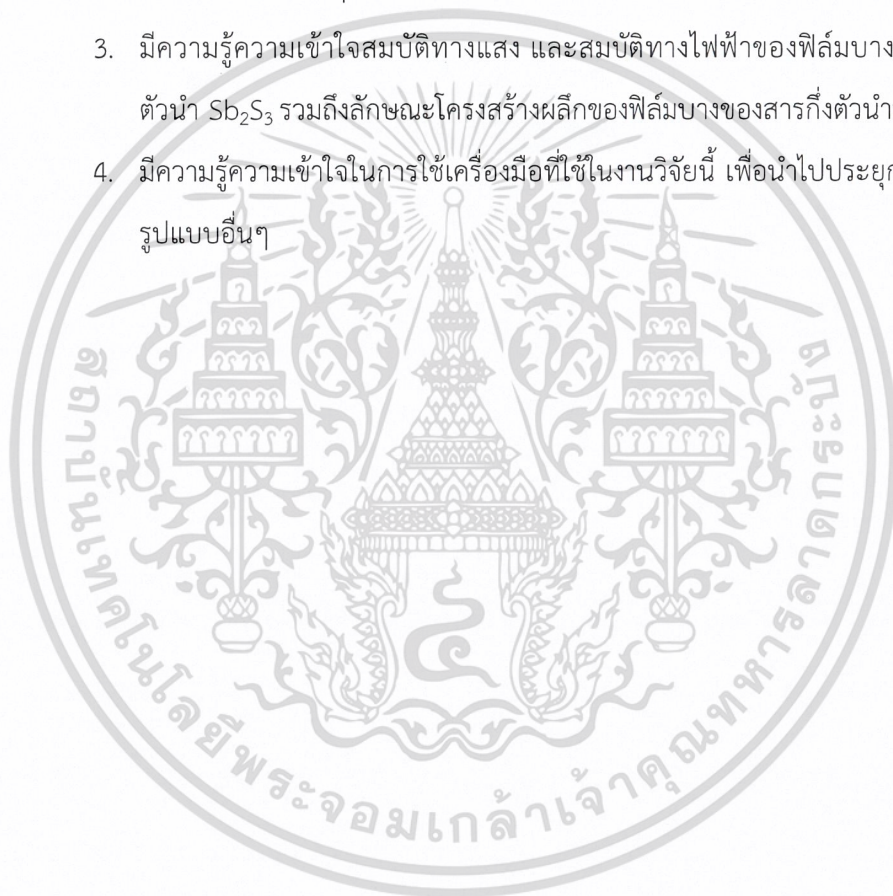
1.4.1 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
- 2) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่อุณหภูมิตั้งต้น 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 4) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 5) ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 6) ศึกษาทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง และวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 25-80 องศาเซลเซียส
- 7) ทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3
- 8) สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
3. มีความรู้ความเข้าใจสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 รวมถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้
4. มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

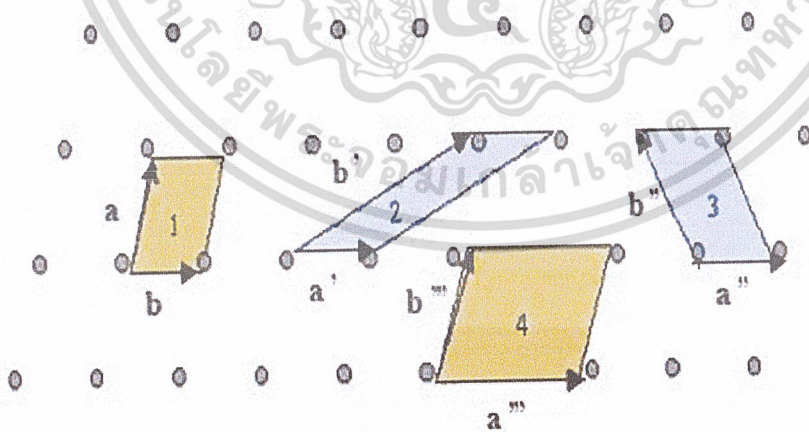
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์ทำได้ไม่จำกัด 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



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

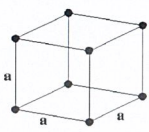

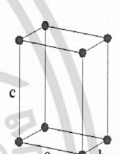

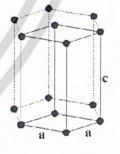
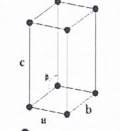
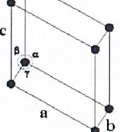
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 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) | $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

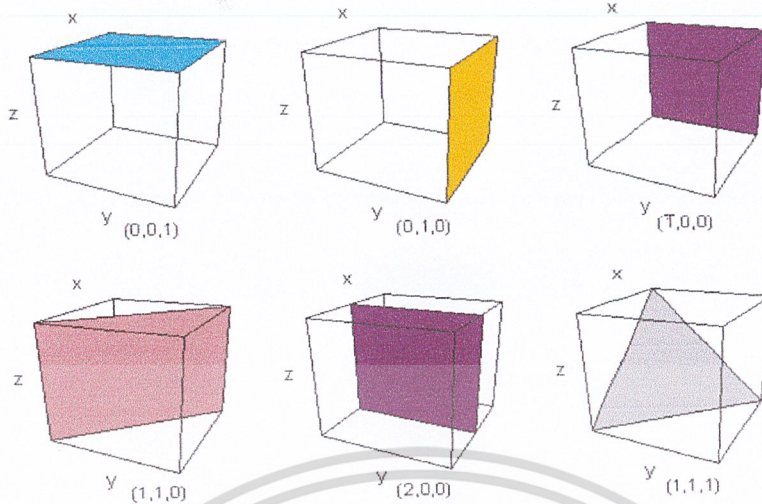
หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

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 “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
 - 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มี

กฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ l) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ไม่ว่าดัชนีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

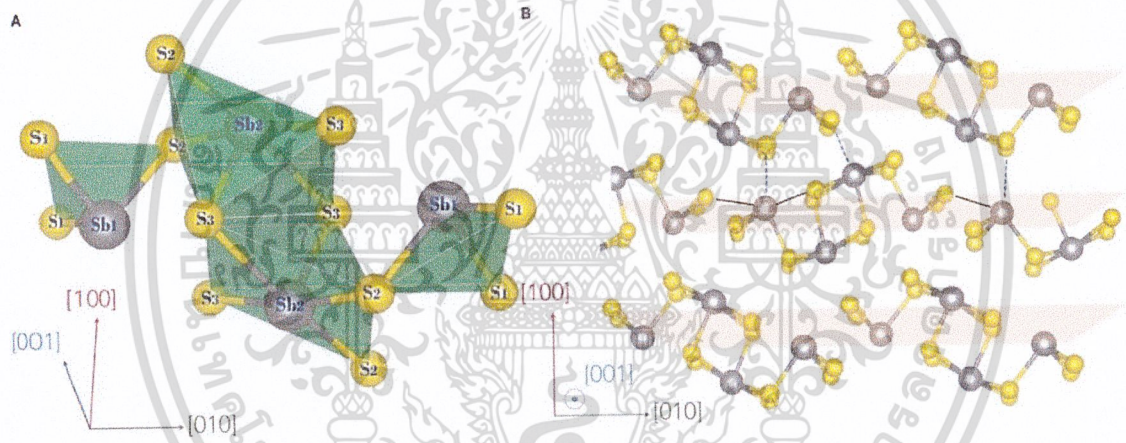
$$I = -(h+k) \quad (2.1)$$

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

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

2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแอนติโมนีไดซัลไฟด์

แอนติโมนีไดซัลไฟด์ เป็นสารประกอบที่มีสูตร Sb_2S_3 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก มีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น $pnma$ เป็นสารกึ่งตัวนำ ช่องว่างแถบพลังงานมีค่า 1.75-2.23 eV และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการใช้งานด้านสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำและสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแอนติโมนีไดซัลไฟด์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

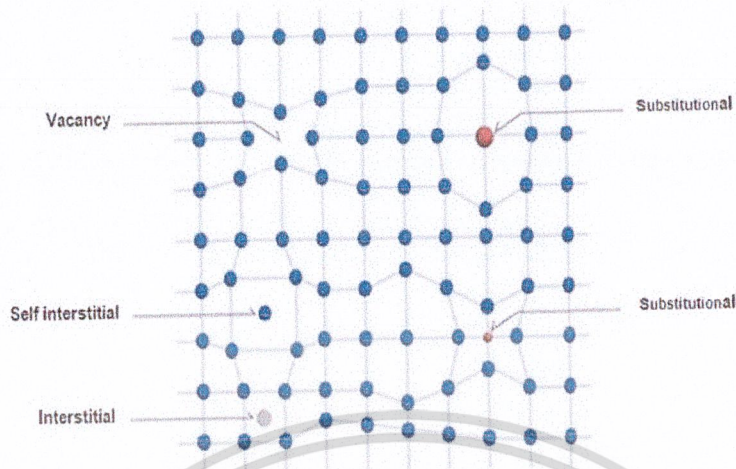
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

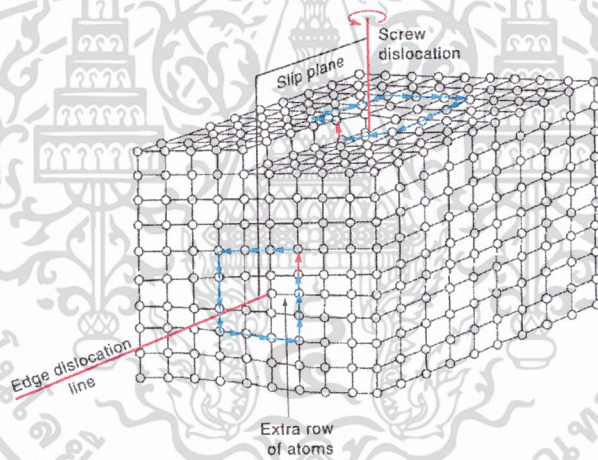
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล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

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.4



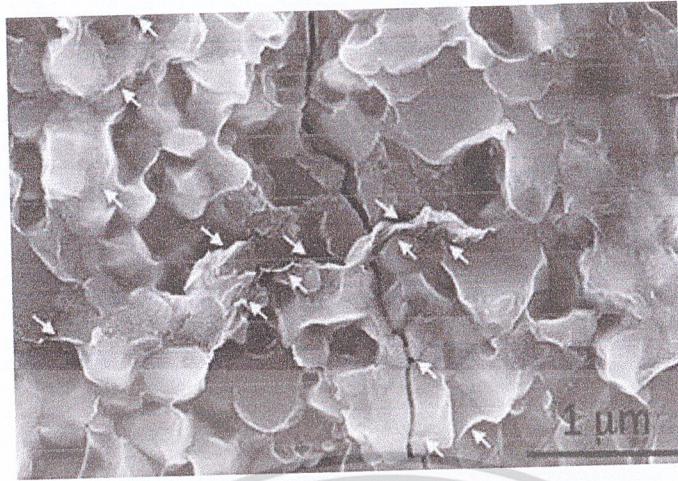
รูปที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

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

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

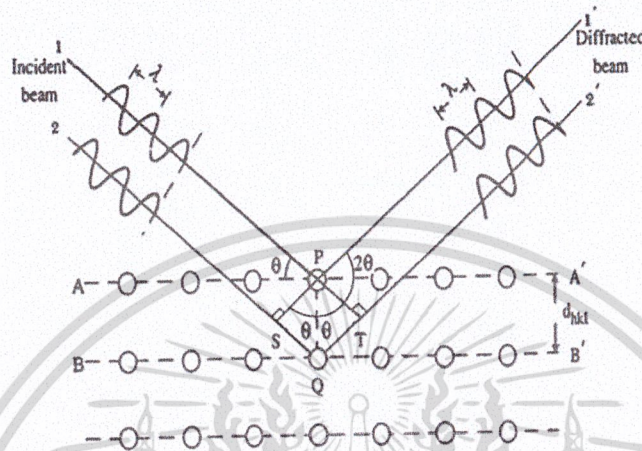
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าว จะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

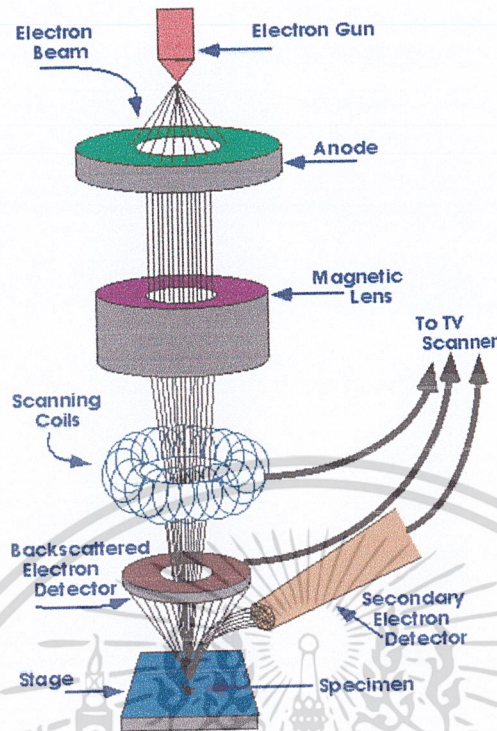
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; จิตินัย, 2551)

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

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

เอกสารนี้เพื่อเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

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

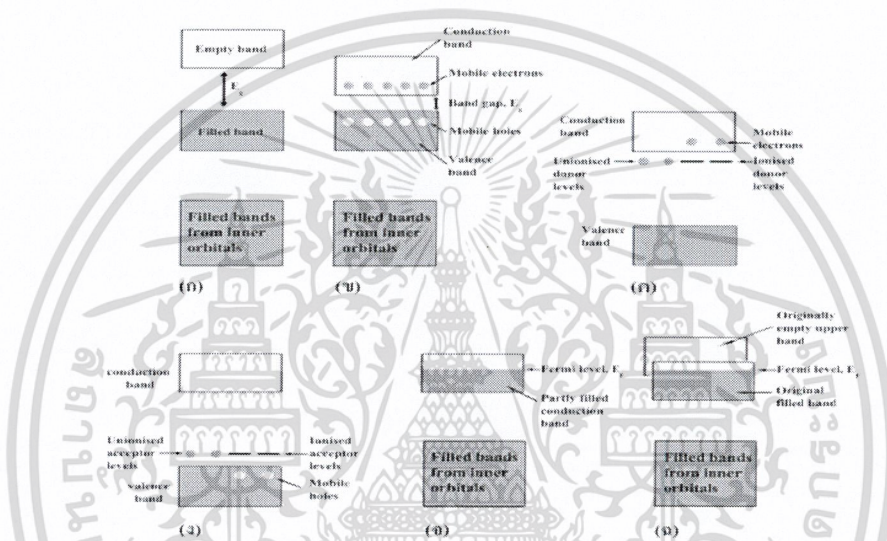
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; รุติณัย, 2549; รุติณัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รุติณัย, 2551)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



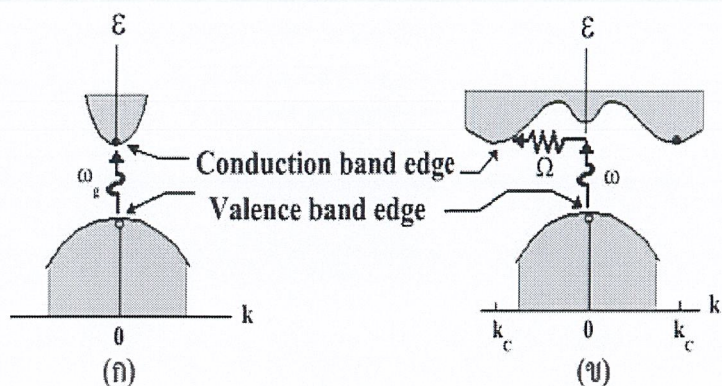
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

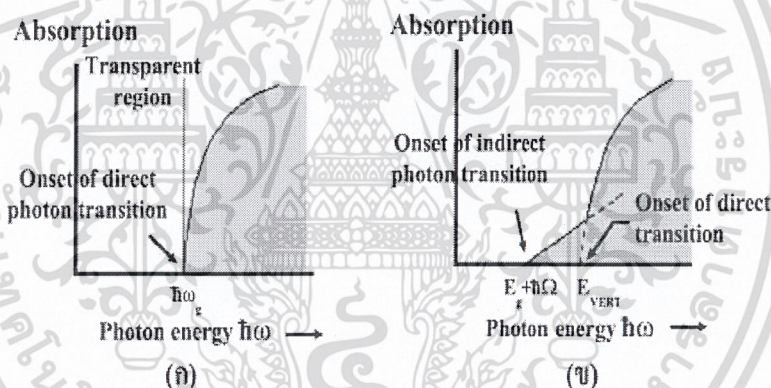
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่า $E_g \gg kt$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกรวมชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว

อะตอมของสารเจือประพติตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพติตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง)สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.9 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอนดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก)และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีความมากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีการบวกรสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

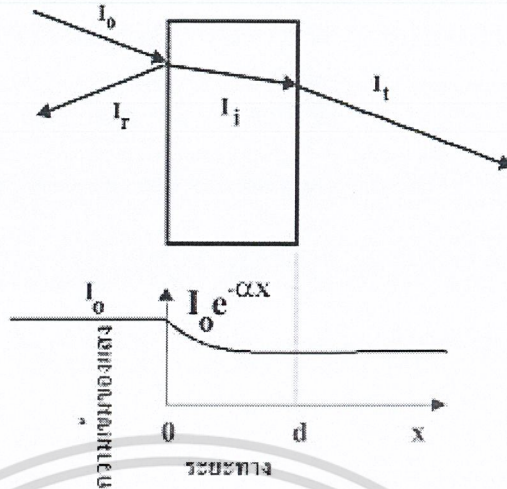


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการ สร้างโฟนอน

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

พิจารณาการศึกษาริวัตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

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

เมื่อ

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R) I_0 \tag{2.4}$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ 1 ครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ 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

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

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่า

ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การไม่ว่องถมิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

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

จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึง การสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อเรากำลังพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดใช้

ต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

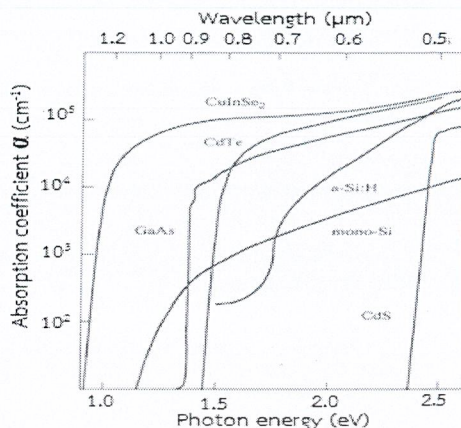
$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.13)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



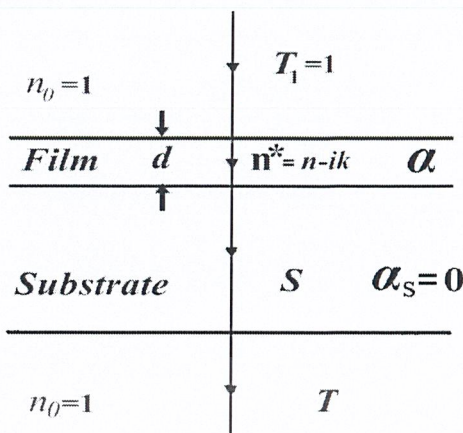
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.5 การหาความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง

ความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง สามารถหาได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่โปร่งแสง ซึ่งจะแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.15 ฟิล์มบางมีความหนา d และดัชนีหักเหเชิงซ้อน $n^* = ik$ เมื่อ n คือจำนวนจริงของค่าดัชนีหักเห ส่วน k คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient) สำหรับความหนาของแผ่นฐานรองรับจะต้องมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มบางในระดับ 100-1000 เท่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางคือ s และประมาณว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแผ่นฐานรองรับ (α_s) มีค่าน้อยมากและประมาณให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าดัชนีหักเหของอากาศ $n_0 = 1$ การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะต้องพิจารณาการสะท้อนแสงทวีคูณ (multiple reflections) ที่รอยต่อ (ดังรูปที่ 2.15) จำนวน 3 รอยต่อ

ถ้าฟิล์มบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือความหนาไม่ลักษณะลาดชัน ลักษณะรีวการแทรกสอดของที่ส่งผ่านฟิล์มบางจะหายไป ดังนั้นจะเห็นเพียงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เป็นเส้นกราฟที่เรียบดังแสดงด้วยเส้นโค้ง T_α ของรูปที่ 2.16 จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่โปร่งแสง ค่า $\alpha = 0$ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะขึ้นกับ n และ s โดยจะต้องมีการสะท้อนแสงทวีคูณเกิดขึ้น สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบาง α มีค่าน้อยและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะเริ่มมีค่าลดลง ส่วนบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงปานกลาง α จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงเนื่องจากผลของ α นี้ และบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างมากด้วยอิทธิพลของ α ดังกล่าว เส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียบ T_α มักจะถูกนำไปใช้หาค่า $\alpha(\lambda)$ ในช่วงแสงตามมองเห็นได้ และช่วงอินฟราเรดเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษา ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางโปร่งแสง

ถ้าความหนา d ของฟิล์มบางมีค่าสม่ำเสมอ จะส่งผลให้สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของรูปที่ 2.16 เป็นเส้นทึบ รีวการแทรกสอดของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบางได้ โดยเริ่มจากการพิจารณากรณีแผ่นรองรับอย่างเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของแผ่นฐานรองรับจะแสดงได้ดังสมการ

$$T_s = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} \tag{2.15}$$

เมื่อ
$$R_s = \left\{ \frac{(s-1)}{(s+1)} \right\}^2 \tag{2.16}$$

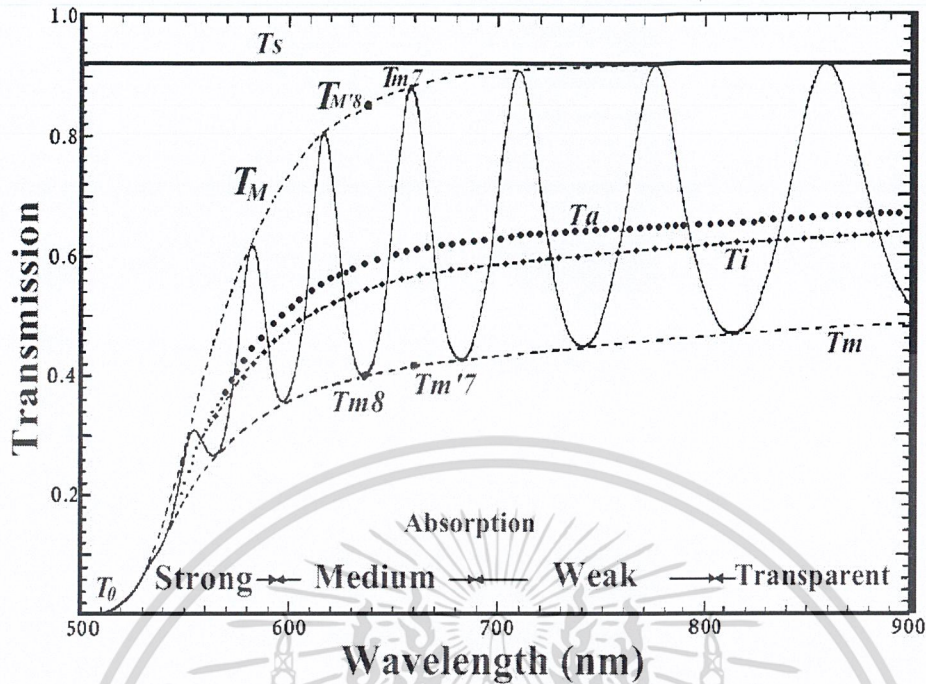
หรือ
$$T_s = \frac{2s}{s^2+1}$$

และ
$$s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s} - 1 \right)^2$$

การเกิดรีวการแทรกสอดจะเป็นไปตามสมการ

$$2nd = m\lambda \tag{2.17}$$

เมื่อ m คือเลขจำนวนเต็มสำหรับรีวการแทรกสอดชนิดเสริมกัน (ซึ่งก็คือสันคลื่น) และ m จะเป็นเลขจำนวนนับหารด้วย 2 สำหรับรีวการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (ซึ่งก็คือท้องคลื่น) ในสมการที่เอกสารนี้(2.17)หาเพียงสมการเดียวก็ไม่สามารัรหาค่า m และ d ได้ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงรีวิการแทรกสอดสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ α -Si : H ที่มีความหนา 1 ไมโครเมตร ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T ของรูปที่ 2.16 จะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha)$$

ถ้ารู้ค่า s แล้ว T สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของ $n(\lambda)$ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $x(\lambda)$ (absorbance) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (x) นี้จะแสดงดังสมการที่ (2.17) แล้วค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จะกลายเป็น

$$T = T(n, x)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานทางแสงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางดังรูปที่ 2.16 จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = \frac{A'x}{B' - C'x + D'x^2} \tag{2.18}$$

เมื่อ $A' = 16s(n^2 + k^2)$

$$B' = [(n+1)^2 + k^2][[(n+1)(n+s^2) + k^2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C' = \left[(n^2 - 1 + k^2) \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) - 2k^2 (s^2 + 1) \right] 2 \cos \phi - k \left[2 \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) + (s^2 + 1) \left(n^2 - 1 + k^2 \right) \right] 2 \sin \phi$$

$$D' = \left[(n-1)^2 + k^2 \right] \left[(n-1)(n-s^2) + k^2 \right]$$

$$\phi = \frac{4\pi n d}{\lambda}$$

$$x = \exp(-\alpha d)$$

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

ในกรณีที่แผ่นฐานรองรับมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มบางมากๆ (เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฐานรองรับมีความหนาเป็นอนันต์) แล้ว T จะกลายเป็น

$$T = \frac{A'x}{B'' - C'x + D'x^2} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$A' = 16s(n^2 + k^2)$$

$$B' = \left[(n+1)^2 + k^2 \right] \left[(n+1)(n+s^2) + k^2 \right]$$

$$C' = \left[(n^2 - 1 + k^2) \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) - 2k^2 (s^2 + 1) \right] 2 \cos \phi - k \left[2 \left(n^2 - s^2 + k^2 \right) + (s^2 + 1) \left(n^2 - 1 + k^2 \right) \right] 2 \sin \phi$$

$$D' = \left[(n-1)^2 + k^2 \right] \left[(n-1)(n-s^2) + k^2 \right]$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (x) ของรูปที่ 2.15 สามารถเขียนอยู่ในพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นเส้นโค้งเรียบ (T_α) ดังนี้คือ

$$x = \frac{P + [P^2 + 2QT_\alpha(1 - R_2R_3)]^{1/2}}{Q} \quad (2.20)$$

$$\text{เมื่อ } Q = 2 T_\alpha (R_1R_2 + R_1R_3 - 2 R_1R_2R_3)$$

$$P = (R_1 - 1)(R_2 - 1)(R_3 - 1)$$

$$R_1 = \left[\frac{1-n}{1+n} \right]^2$$

$$R_2 = \left[\frac{n-s}{n+s} \right]^2$$

$$R_3 = \left[\frac{s-1}{s+1} \right]^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น เราจะให้ $k=0$ แล้วสมการที่ (2.20) จะกลายเป็น

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ $A = 16n^2s$ (2.22ก)

$$B = (n+1)^3 (n+s^2) \quad (2.22ข)$$

$$C = 2(n^2-1)(n^2-s^2) \quad (2.22ค)$$

$$D = (n-1)^3 (n-s^2) \quad (2.22ง)$$

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.22จ)$$

$$x = \exp(-d) \quad (2.22ฉ)$$

แล้วจะได้ว่า T_M และ T_m ของรูปที่ 2.16 คือ

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (2.23)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (2.24)$$

ถ้าพิจารณาให้ T_M และ T_m เป็นฟังก์ชันของ λ หรือเป็นฟังก์ชันของ n (λ) และของ x (λ) อีกทั้ง T_M และ T_m เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ที่ความยาวคลื่น λ ใดๆค่า T_M จะสัมพันธ์กับ T_m ยกตัวอย่างเช่น T_{M7} จะสัมพันธ์กับ T'_{M7} และ T_{M8} จะสัมพันธ์กับ T'_{M8}

2.5.1 ย่านที่โปร่งแสง

เป็นบริเวณที่ $\alpha = 0$ หรือ $x = 1$ ให้แทนสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.23)

จะได้ว่า
$$T_M = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.25)$$

สมการที่ (2.25) นี้จะให้ผลเหมือนกับสมการที่ (2.15) และจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเป็นฟังก์ชันของ s อย่างเดียว และซ้อนทับกับเส้น T_s แต่เมื่อจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันนี้เริ่มเบนออกจาก T_s จะแสดงว่าจุดเริ่มต้น (onset) ของการดุดกคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารเริ่มปรากฏขึ้นแล้วดังนั้นค่า s สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.25) ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.23) โดยให้ $x = 1$ จะได้ว่า

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4 + n^2(s^2 + 1) + s^2}$$

หรือ
$$n = [M + (M^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.26)$$

เมื่อ
$$M = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

โดยที่ T_m จะเป็นฟังก์ชันของทั้ง n และ s แล้วค่า n จะคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.26) นี้เองและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ λ

2.5.2 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางนี้ $\alpha \neq 0$ และ $x < 1$ จากสมการที่ (2.26) และ (2.24) ผลต่างของส่วนกลับของ T_M และ T_m จะไม่ขึ้นกับตัวแปร x ดังนี้คือ

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (2.27)$$

ทำการแทนที่สมการที่ (2.22) ลงใน (2.27) จะสามารถทำให้หาค่า n ได้

$$n = [N + (N^2 - s^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.28)$$

เมื่อ
$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{(s^2 + 1)}{2}$$

สมการที่ (2.28) นี้สามารถนำไปหาค่า $n(\lambda)$ จาก T_M และ T_m ได้ เมื่อทราบค่า $n(\lambda)$ แล้ว ค่าคงที่ทุกตัว ของสมการที่ (2.22) ก็จะหาได้ทันที และค่า x สามารถคำนวณหาได้จากหลายวิธี สมการที่ (2.23) และ (2.24) เป็นสมการยกกำลังสอง (quadratic function) ของตัวแปร x จากการแก้สมการที่ (2.23) จะได้ว่า

$$x = \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)(n^2 - s^4)]^{1/2}}{(n - 1)^3(n - s^2)} \quad (2.29)$$

เมื่อ
$$E_M = \frac{8n^2s}{T_M} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าจากการแก้สมการที่ (2.21) จะได้ว่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \frac{E_m - \left[E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^2) \right]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.30)$$

เมื่อ
$$E_m = \frac{8n^2 s}{T_m} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

และจากสมการที่ (2.23) และ (2.24) จะได้ว่า

$$\frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} = \frac{Ax}{B + Dx^2} \quad (2.31)$$

แก้สมการเพื่อหาค่า x จะได้ว่า

$$x = \frac{F - \left[F^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.32)$$

เมื่อ
$$F = \frac{8n^2 s}{T_i}$$

และ
$$T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.31) และ (2.21) เห็นได้ว่า T_i คือเส้นโค้งที่ผ่านจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของรีฟการแทรกสอดของรูปที่ 2.16 เส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียก T_α สามารถที่จะคำนวณหาได้จากรีฟการแทรกสอดของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.21) ระหว่างจุดสูงสุด (สันคลื่น) กับจุดต่ำสุด (ท้องคลื่น) ดังนี้คือ

$$T_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} d\phi$$

ประมาณว่าเป็นการอินทิเกรตในบริเวณแคบๆ (narrow integration region) ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่าคงที่แล้วผลของการอินทิเกรตคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไปอนกนให้หน้าไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_\alpha = \frac{Ax}{[(B - Cx + Dx^2)(B + Cx + Dx^2)]^{1/2}} \quad (2.34)$$

แทนสมการที่ (2.33) และ (2.34) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$T_\alpha = \sqrt{T_M T_m} \quad (2.35)$$

โดยที่ T_α จะเป็นค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต (geometric mean) ของ T_M และ T_m ซึ่งสมการที่ (2.5) จะเป็นสมการที่มีประโยชน์ จากสมการที่ (2.34) สามารถหาค่า x ได้ดังนี้ คือ

$$x = \frac{\left\{ G - \left[G^2 - (n^2 - 1)^6 (n^2 - s^4) \right]^{1/2} \right\}^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.36)$$

เมื่อ
$$G = \frac{128n^4 s^2}{T^2} + n^2 (n^2 - 1)^2 (s^2 - 1)^2 + (n^2 - 1)^2 (n^2 - s^2)^2$$

สมการที่ (2.34) สมมูลกับสมการที่ (2.20) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงในย่านตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด สมการที่ (2.34) นี้ยังสามารถใช้หาค่า n จากสเปกตรัม T_α ในบริเวณที่โปร่งแสง (เมื่อ $\alpha=0$) การคำนวณหาค่า n จะเริ่มจากการให้ค่า x ของสมการที่ (2.34) เท่ากับ 1 แล้วจะได้ว่า

$$n = \left[H + (H^2 - s^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2.37)$$

เมื่อ
$$H = \frac{4s^2}{(s^2 + 1)T\alpha^2} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

มานิฟายซีเยร์และผู้ร่วมงานได้ทำการคำนวณหาค่า x จากเงื่อนไขแผ่นรองรับมีความหนาอนันต์ (infinite substrate) ซึ่งจะได้ว่า

$$x = \frac{(n+1)(s+n)[1 - (T_M/T_m)^{1/2}]}{(n-1)(s-n)[1 + (T_M/T_m)^{1/2}]} \quad (2.38)$$

สมการที่ (2.38) ไม่สมมูลกับสมการที่ (2.26), (2.27), (2.32) และ (2.36)

2.5.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง รั้วการแทรกสอดจะไม่ปรากฏให้เห็น ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า n และ x จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงแต่เพียงอย่างเดียวได้ ค่า n ของบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรงนี้สามารถประมาณได้จากการลากส่วนต่อจากบริเวณอื่น

เช่น จากบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง เป็นต้น ส่วนค่า x สามารถคำนวณหาได้จากสมการใดสมการหนึ่งของสี่สมการอันได้แก่ สมการที่(2.29), (2.30), (2.32) และ (2.35) ใช้

สำหรับ α ที่มีค่ามากๆ เส้นกราฟทั้งสี่ คือ T_M, T_α, T_i และ T_m จะลู่อเข้าซ้อนกันเป็น T_0 ถ้าไม่พิจารณาการแทรกสอดและให้ $x \leq 1$ สมการที่ (2.16) สามารถเขียนได้เป็น

$$T_0 \approx \frac{Ax}{B}$$

$$\text{หรือ} \quad x \approx \frac{(n-1)^3(n+s^2)}{16n^2s} T_0 \quad (2.39)$$

2.5.4 แบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อทดสอบความแม่นยำของทฤษฎีนี้ จะกำหนดให้ $S = 1.51$ ความหนา (d) ของฟิล์มบาง α -Si:H เท่ากับ 1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหจะเขียนในรูปของสมการคอซี (Cauchy's equation) ดังนี้

$$n = \frac{3 \times 10^5}{\lambda^2} + 2.6 \quad (2.40)$$

ส่วนค่าลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือ

$$\log \alpha = \frac{1.5 \times 10^6}{\lambda^2} - 8 \quad (2.41)$$

โดยที่ α มีหน่วยเป็น ต่อนาโนเมตร

จากค่า $n(\lambda)$ และ $\alpha(\lambda)$ ดังกล่าวข้างต้น นำเอาไปทำแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองได้อย่างดี เมื่อทราบค่า $\alpha(\lambda)$ แล้วก็สามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง $k(\lambda)$ จากความสัมพันธ์

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

สำหรับการหาค่าความหนาของฟิล์มบาง (d) ให้พิจารณาที่คลื่นหรือท้องถิ่นที่อยู่ติดกัน เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่มีความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ตามลำดับ จากสมการที่(2.17)จะได้ว่าความหนาของฟิล์มบางคือ

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2)} \quad (2.42)$$

สรุปได้ว่าสำหรับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตร จะเป็นเส้นโค้งเรียบแผ่นฐานรองรับเป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่มีความหนาในราว 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงประมาณว่า ความหนาของแผ่นรองรับเป็นอนันต์แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการที่ (2.19) ส่วน α จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า x จากสมการที่ (2.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว(single oscillator model)

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

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.43)$$

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

โดยที่ P คือค่าส่วนหลัก (principal part) สำหรับในวัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่านโปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_c \quad (2.44)$$

เมื่อ ω_c คือ ความถี่ขีดเริ่ม และ $\epsilon_1 = n^2$ สำหรับความถี่ ω นี้จะกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งหมด จากสมการที่ (2.44) ค่าดัชนีหักเหสามารถหาได้จากการอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ถึงแม้ว่ากระบวนการคำนวณหาค่า $\epsilon_2(\omega)$ จะอยู่ในกรอบของทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียว (one electron band theory of solids) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลินโซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีแนวโน้มคลุมเคลือขึ้นกับรายละเอียดของการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายิ่งวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิกเทน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน์ (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อนิยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap; E_g) ในขณะที่ เวมเพิล-โดโดเมนนิโค ใช้ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแสง เพื่อนิยามพารามิเตอร์ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (dispersion energy; E_D) พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์มากเนื่องจากสามารถ

สร้างเป็นสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายได้และใช้ได้ดีกับสารประกอบจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสมการความสัมพันธ์เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือจะสัมพันธ์กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกและความเป็นไอออนิกของผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะสมบัติของค่าดัชนีหักเหของวัสดุของแข็งต่างๆ

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา (time dependent perturbation theory) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} \int_{\text{BZ}} d^3k \frac{f_{ij}^\alpha(\vec{k})}{(\omega_{ij}^2(\vec{k}) - \omega^2)} \quad (2.45)$$

ซึ่ง e และ m คือประจุและมวลของอิเล็กตรอน ทำการหาค่าผลรวม (summation) ครอบ คลุมทุกแถบพลังงาน i และ j โดยที่ $i \neq j$ และทำการอินทิเกรตตลอดทั่วทั้งบริลลันโซน สำหรับ $f_{ij}^\alpha(\vec{k})$ คือความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงาน i และ j ในทิศทางโพลาไรซ์ค่า α จากสมการที่ (2.85) สามารถทำการประมาณได้สองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าทำการทดลองวัดได้จริง โดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสงเช่นในย่านที่มีความถี่ในช่วง $\omega < \omega_{ij}$

เพนน์ (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้แบบจำลอง อิเล็กตรอนอิสระในแบบไอโซโทรอปิกที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ถ้าประมาณให้ $\hbar\omega_{ij} \approx E_g$ แล้วสมการที่ (2.45) จะกลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum_{i,j} \int_{\text{BZ}} d^3k f_{ij}^\alpha(\vec{k}) \quad (2.46)$$

และ

$$\sum_j \int_{\text{BZ}} d^3k = 4\pi n_v \quad (2.47)$$

เมื่อ n_v คือค่าความหนาแน่นยังผลของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ (effective density of valence electrons) แล้วสมการที่ 2.46 จะลดรูปได้เป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{(\hbar\omega_p)^2}{E_g^2} \quad (2.48)$$

เมื่อ $\omega_p^2 = 4\pi n_v e^2 / m$ คือค่าความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่สูง ถ้ากำหนดให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีอย่างละหนึ่งแถบ

เอกสารนี้ (single group of valence and conduction band) แล้วสมการที่ (2.45) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi^2}{m\Omega} \sum_{\mathbf{k}} \frac{f_{cv}^\alpha(\vec{\mathbf{k}})}{\omega_{CV}^2(\vec{\mathbf{k}}) - \omega^2} \quad (2.49)$$

เมื่อ Ω คือปริมาตรของผลึก ส่วน c และ v คือแถบนำและแถบวาเลนซ์ ถ้าประมาณว่าการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำในบริลลันโซนเกิดเป็นออสซิลเลเตอร์และอิเล็กตรอนวาเลนซ์หนึ่งตัวจะทำให้เกิดเป็นออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว ดังนั้นจะประมาณสมการที่ (2.49) ได้ว่าเป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_n \frac{f_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (2.50)$$

เมื่อ f_n คือ ค่าความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ของไดโพลทางไฟฟ้าที่สังสรรค์กับการย้ายสถานะพลังงานที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n การหาผลรวม (summation) ให้ครอบคลุมทุกออสซิลเลเตอร์ที่สอดคล้องกับความถี่ ω_n (โดยที่ $\omega < \omega_n$) สามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนซึ่งส่วนแรกคือออสซิลเลเตอร์ตัวที่หนึ่งซึ่งมีค่า $f_1/(\omega_1^2 - \omega^2)$ และส่วนที่สองคือ

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

ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกันโดยที่ยังคงรักษาพจน์ ω^2 จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดียวมีค่าดังนี้คือ

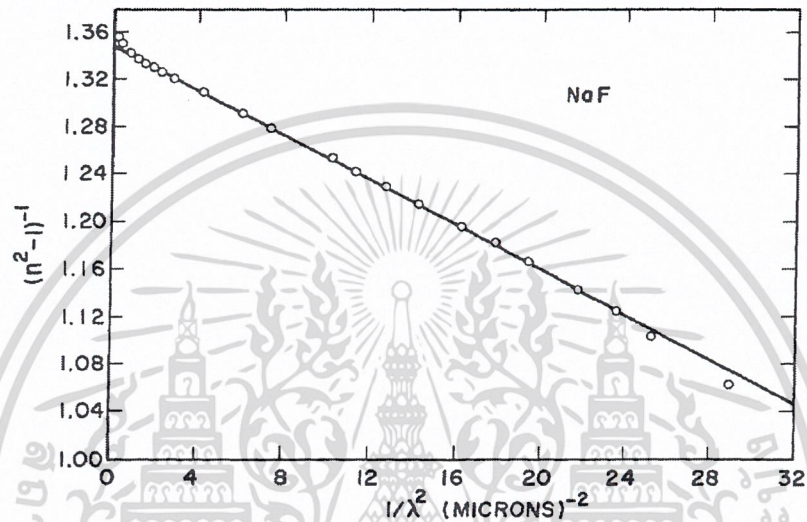
$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.51)$$

ซึ่งพารามิเตอร์ E_0 และ F จะสัมพันธ์กับ f_n และ ω_n ของสมการที่ (2.50) จากสมการที่ (2.51) จะทำให้สามารถประมาณหาค่าพารามิเตอร์สองตัวได้ที่พลังงาน $\hbar\omega < \hbar\omega_c$ สมการที่ (2.51) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องดีกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์ E_0 และ F ที่ได้จากผลการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆได้หรือไม่ แวมเพิล-ไดโอดเมนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนต์ของสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะอีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $E_d = F/E_0$ ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.51) สามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) ดังนี้คือ

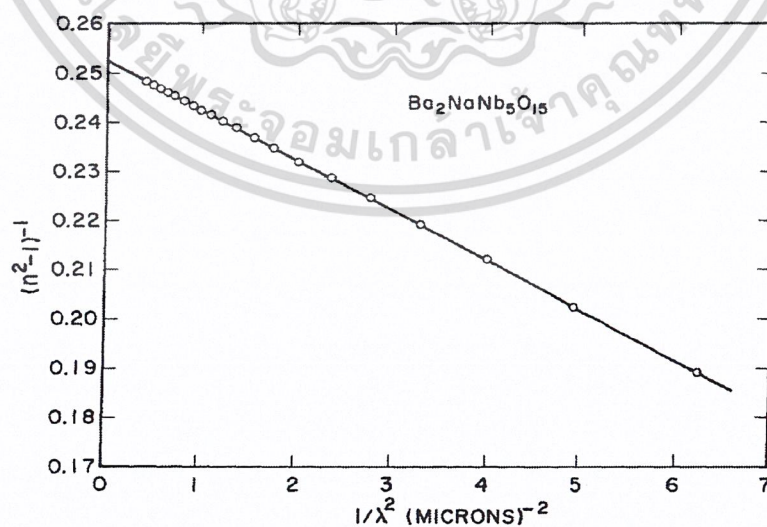
$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_0}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.52)$$

จากสมการที่ (2.52) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ω^2 แล้วจะได้ค่าความชันคือ $1/E_d E_0$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ E_0/E_d ตัวอย่างสมการที่ (2.52) ของฟิล์มบางของ

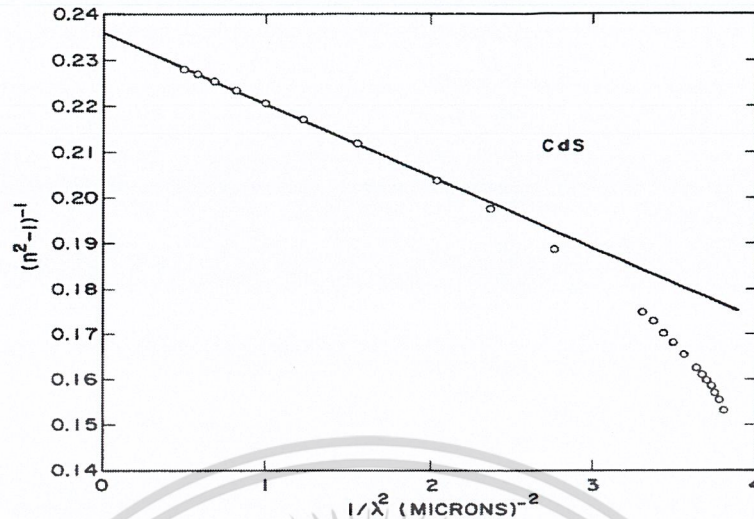
สารประกอบ NaF, $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ และ CdS จะแสดงดังรูป 2.17-2.19 ที่ความยาวคลื่นยาว (long wavelength) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของแลตทิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับกรณีที่มีความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ดังปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างค่าพารามิเตอร์ E_0 กับ E_d ของออสซิลเลเตอร์เดียวกับสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้จากสมการที่ (2.42) กับสมการที่ (2.43) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่ r ของค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสงดังนี้คือ

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_i}^{\infty} E^r \epsilon_2(E) dE \quad (2.53)$$

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.54)$$

และ

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

(2.55)

พลังงานออสซิลเลเตอร์ E_0 จะไม่ขึ้นกับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_0 นี้คือค่าเฉลี่ยของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในขณะที่ E_d จะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_d จะทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงความแรงของการย้ายเอกสารนี้เสถียรพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ เนื่องจากโมเมนต์ที่ M_{-1} กับ โมเมนต์ที่ M_{-3} จะเกี่ยวข้อง ารค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ E_0 และ E_d การให้น้ำหนักแก่ค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ชั่วคราวทางแสง $\varepsilon_2(\omega)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าใกล้ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.56) และ (2.57) กับสมการที่มีปริมาณ $\hbar\omega_p$ และ E_g ของแบบจำลองฟิลิปส์แล้วพบว่า

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (2.56)$$

$$\text{และ} \quad E_g^2 = \frac{M_1}{M_{-1}} \quad (2.57)$$

ดังนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิลิปส์ (E_g) คืออัตราส่วนของโมเมนต์ที่ M_1 ต่อโมเมนต์ M_{-1} (ตั้งสมการที่ (2.57)) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา M_1 แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้ M_{-1}/M_{-3} เพื่ออธิบายความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ que แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์และโฮปฟิลด์ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ E_a โดยนิยามว่า

$$E_a^2 = M_3/M_1 \quad (2.58)$$

และแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงาน E_a นี้ จะสัมพันธ์กับค่าอินทิกรัลของผลคูณระหว่างค่าลาปลาเซียนของศักย์ไฟฟ้าของผลึกกับความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่า E_0 , E_g และ E_a จะแสดงความสมมาตรได้อย่างชัดเจนตั้งสมการที่ (2.54), (2.57), (2.58) และยังแสดงให้เห็นว่า

$$E_i < E_0 < E_g < E_a \quad (2.59)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน (ไม่ก่อให้เกิดการเผยแพร่) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 หรือ $\left(\frac{1}{n^2 - 1}\right) = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2$ (2.60)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.60) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (2.61)$$

$$\text{และ จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.62)$$

จากสมการที่ (2.62) และ (2.63) สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดีสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (2.63)$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

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

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

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

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.64)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (2.65)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $n^* = \sqrt{\epsilon^*}$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.66) ารค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $n^* = n - ik$ (2.67)

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (2.68)$$

โดยที่ $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$ (2.69)

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (2.70)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้ คือ

เมื่อ $\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$ (2.71)

และ $\sigma_1 = \omega\varepsilon_2\varepsilon_0$ (2.72)

$$\sigma_2 = \omega\varepsilon_1\varepsilon_0$$

2.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสเปกโทรสโกปี (dielectric spectroscopy)

2.7.1 แบบจำลองของลอเรนตซ์ (Lorentz model)

อิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตริกจะยึดเหนี่ยวด้วยแรงคูลอมบ์อยู่กับไอออนคอร์ (ion core) ของแลตทิซ (lattice) เมื่อสารไดอิเล็กตริกอยู่ภายใต้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะกวัดแกว่ง (oscillate) รอบตำแหน่งสมดุลในแบบฮาร์มอนิก ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัมจะหมายถึงอิเล็กตรอนมีการทรานซิชันจากระดับพลังงานค่าหนึ่งไปยังระดับพลังงานอีกค่าหนึ่ง ในกลศาสตร์แผนเดิมจะประมาณว่าออสซิลเลเตอร์เป็นแบบหน่วง (damped oscillator) ซึ่งแรงหน่วงนี้เกิดจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเอง และอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ เป็นต้น ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนในเนื้อสารไดอิเล็กตรอนจะมาจากแรงคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แรงคืนตัวเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวคูลอมบ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนคอร์ และแรงหน่วงเนื่องจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ จากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$\sum F = mx'' = -\beta x' - k_s x - eE_x \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x = E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.74)$$

แทนสมการที่ (2.73) ลงในสมการที่ (2.74) จะได้

$$x'' + \gamma x' + \omega_0^2 x = \frac{-e}{m} E_0 \exp(-i\omega t) \quad (2.75)$$

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

k_s คือค่านิจของสปริง

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

m คือมวลของอิเล็กตรอน

สมการคำตอบของค่าการกระจัดของออสซิลเลเตอร์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$x(t) = A \exp(-i\omega t) \quad (2.76)$$

แทนสมการที่ (2.76) ลงในสมการที่ (2.75) จะได้ว่า

$$A = \frac{-eE_0}{m} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right) \quad (2.77)$$

สมการที่ (2.76) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$x(t) = \left[\frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \right] \exp(-i\omega t) \quad (2.78)$$

ไดโพลโมเมนต์ชั่วครู่ทางไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนหนึ่งตัว เรียกว่า ค่าโพลาริเซชันของออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว จะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned} P &= -ex \\ &= \frac{e^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \end{aligned} \quad (2.79)$$

ค่าโพลาริเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะมีค่า

$$P = Nex$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{Ne^2 E_0 \exp(-i\omega t)}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \\
 &= \left[\frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma} \right] \epsilon_0 E
 \end{aligned} \tag{2.80}$$

เมื่อ $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} = \text{ความถี่พลาสมา}$ (2.81)

และ N คือจำนวนอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือคือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่าโพลาไรเซชัน ยังสัมพันธ์กับ ค่าสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนี้

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \tag{2.82}$$

จากสมการที่ (2.80) และ (2.82) จะได้ว่า

$$\chi = \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)} \tag{2.83}$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ^*) จะสัมพันธ์กับค่า χ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \epsilon^* &= \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 + \chi \\
 &= 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)}
 \end{aligned} \tag{2.84}$$

จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \tag{2.85}$$

$$\epsilon' = \frac{\omega_p^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \tag{2.86}$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega_p^2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} \tag{2.87}$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าดัชนีหักเห (n^*) จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} = n + ik \quad (2.88)$$

โดยที่ $n^2 - k^2 = \epsilon'$ (2.89)

$$2nk = \epsilon'' \quad (2.90)$$

เมื่อ n และ k คือ ค่าดัชนีหักเห และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวกลาง สำหรับใน กลศาสตร์แผนเดิม ω_0 คือ ค่าความถี่กำหนดของออสซิลเลเตอร์ที่กวัดแกว่งแบบฮาร์โมนิก อย่างง่ายหนึ่งตัวแต่สำหรับกลศาสตร์ควอนตัม ω_0 จะสอดคล้องกับผลต่างของระดับพลังงาน ตอนสุดท้ายกับระดับพลังงานตอนต้น สำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว (multiple oscillator) ค่าคงที่ได้ิเล็กทริกเชิงซ้อน คือ $\epsilon/\epsilon_0 = 1 + \chi$ ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon^* = 1 + \omega_p^2 \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.91)$$

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

$$\sum_j f_j = z \quad (2.92)$$

นิยมเรียกสมการที่ (2.92) ว่าเป็นสมการของแบบจำลองลอเรนตซ์ (Lorentz model)

จากสมการที่ (2.92) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\epsilon^* = 1 + \frac{Nq^2}{m\epsilon_0} \sum_j \left[\frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j} \right] \quad (2.93)$$

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

กรณีที่เป็นตัวกลางดิสเพอร์ชัน (dispersion medium) สมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ความถี่ใดๆคือ

$$\nabla^2 \tilde{E} = \tilde{\epsilon}\mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{E}}{\partial t^2} \quad (2.94)$$

จะได้สมการของคลื่นระนาบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยทางโรงเรียนโพธิสารพิทยากร ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{i(\tilde{k}z - \omega t)} \quad (2.95)$$

จำนวนเชิงซ้อนของค่าเลขคลื่น (\tilde{k}) คือ

$$\tilde{k} \equiv \sqrt{\tilde{\epsilon} \mu_0 \omega} \quad (2.96)$$

เมื่อเขียน \tilde{k} อยู่ในพจน์ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ

$$\tilde{k} = k + ik \quad (2.97)$$

จากสมการที่ (2.95) กลายเป็น

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_0 e^{-kz} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.98)$$

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

$$\alpha = 2k \quad (2.99)$$

สมการที่ (2.99) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ $\frac{\omega}{k}$ และค่าดัชนีหักเหของตัวกลางคือ

$$n = \frac{ck}{\omega} \quad (2.100)$$

สำหรับตัวกลางที่เป็นแก๊สแล้ว พจน์ที่สองของสมการที่ (2.94) จะมีค่าน้อย และสามารถประมาณค่ารากที่สองในสมการที่ (2.97) โดยใช้พจน์แรกของการกระจายแบบไบโนเมียล $\sqrt{1+\epsilon} \cong 1 + \frac{1}{2}\epsilon$ จะได้ว่า

$$\tilde{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} \cong \frac{\omega}{c} \left[1 + \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 - i\gamma_j\omega} \right] \quad (2.101)$$

$$n = \frac{ck}{\omega} \cong \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j (\omega_{0j}^2 - \omega^2)}{(\omega_{0j}^2 - \omega^2)^2 + \gamma_j^2 \omega^2}$$

ถ้าพิจารณาในช่วงความถี่ที่ต่างจากความถี่กำทอน แล้วการหน่วงสามารถตัดทิ้งได้และสูตรในการหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = 1 + \frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2} \quad (2.102)$$

วัสดุโดยส่วนใหญ่จะมีความถี่ธรรมชาติ ω_j แต่สำหรับวัสดุที่โปร่งแสงแล้วค่าความถี่กำ
ทอนจะอยู่ในย่านความถี่ของคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้น $\omega < \omega_j$ แล้วจะได้

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

และจากสมการที่ (2.101) เปลี่ยนรูปเป็น

$$n = 1 + \left(\frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2} \right) + \omega^2 \left(\frac{Nq^2}{2m\epsilon_0} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^4} \right) \quad (2.103)$$

หรือในพจน์ของค่าความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ หรือในอากาศ

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

$$n = 1 + A \left(1 + \frac{B}{\lambda^2} \right) \quad (2.104)$$

จากสมการที่ (2.104) เป็นที่รู้จักในนามของ สมการคอดี (Cauchy's formula) ค่าคงที่
A คือค่าสัมประสิทธิ์ของการหักเห และ B คือค่าสัมประสิทธิ์ของดิสเพอร์ชัน สมการคอดีใช้ได้
กับตัวกลางที่เป็นแก๊สที่อยู่ในย่านความถี่ของคลื่นแสงที่ตามองเห็น (optical region)

2.8 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งาม นิศย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า
เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำ
ไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คืออัตราส่วนของ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current
density : J) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p) E \quad (2.105)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
P คือ ความหนาแน่นของโฮล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.106)$$

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

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.107)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.108)$$

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.9 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จิตินัย, 2551)

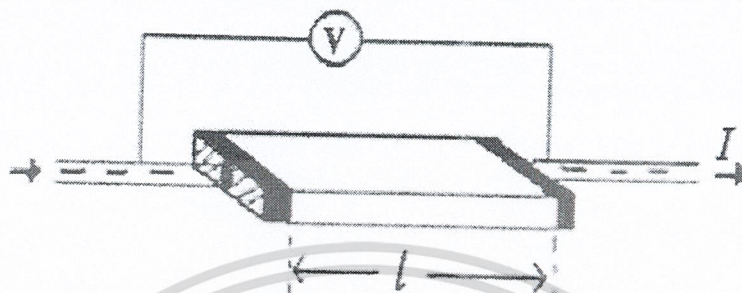
วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.9.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.20 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.109)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.110)$$

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

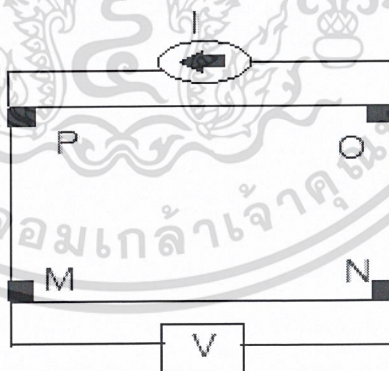
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.22 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความ

ต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_V จากสมการที่ (2.111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.111)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.112)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.112)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.113)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย $f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2$ (2.114)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.115)$$

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

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

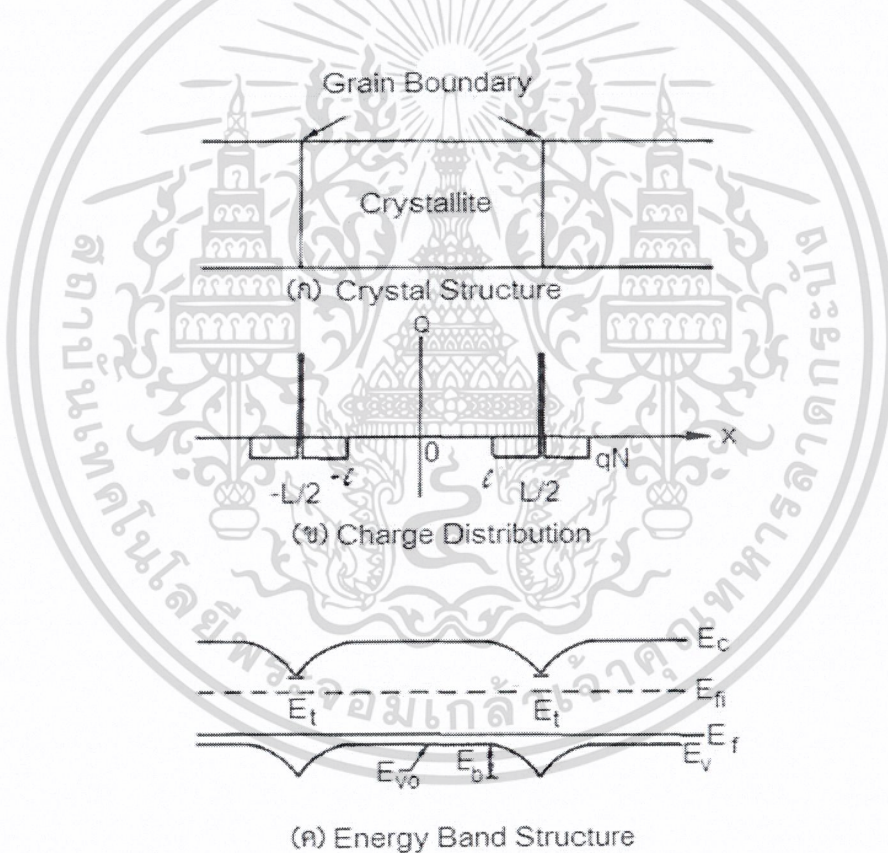
1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ลดด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยวสามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนโวสาหรับการใชงานเพื่การศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ข้อบกพร่องผลึกถือว่าเป็นกับดักพาหะที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้วกับดักพาหะกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักพาหะมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักพาหะจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักพาหะจะเป็นผู้ให้ (donor)
7. ระดับพลังงานของกับดักพาหะ (E_t) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน
8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออนไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่

2.23



รูปที่ 2.23 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.10.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

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

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.116)$$

เมื่อ

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.117)$$

และ

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.118)$$

สมการที่ (2.117) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.119)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.120)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.121)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.122)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับความเข้าใจของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.123)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) สำหรับ ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ N_t สามารถหาได้จากสมการ เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของ เซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.124)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.125)$$

ส่วนระดับพลังงานของกักตักพาหะ(E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.126)$$

2.10.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพ่องพาหะเพียงบางส่วนยิ่งจะ สอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_F - E_t - E_b \gg kT$ สภาพนำไฟฟ้าจะ สัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.127)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.127) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^2 = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.128)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.129)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.130)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.131)$$

$$E_a = -\frac{1,000(k)(\text{ความชัน})}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.132)$$

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (2.133)$$

เมื่อ ϵ_s คือ เฟอร์มิตตีวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al., 2011) จากสมการที่ (2.132) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.132) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.134)$$

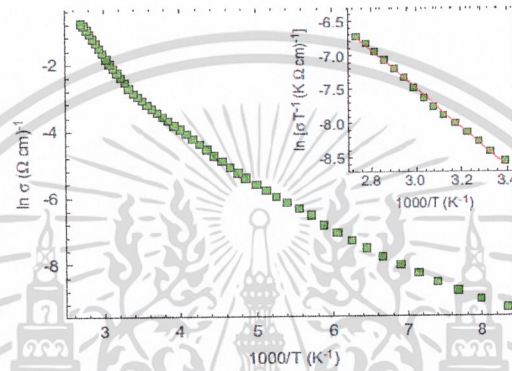
สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_F + E_t - E_b \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) แสดงว่ากับดักพาหะบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้านั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

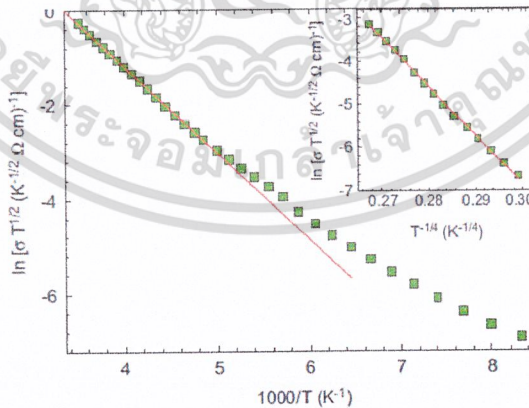
$$\sigma = eN_c^2 Lv_c (2\varepsilon_s N_d^{-1} E_b)^{1/2} (kTN_i)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.135)$$

สูง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_i \quad (2.136)$$



รูปที่ 2.24 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 2.25 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

2.10.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย์, 2555; รุติไฉย, 2556)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.137)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.138)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.139)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

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

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.137) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ

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

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi a k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.140)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.141)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $kN(E_F)$ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์ที่สงวนลิขสิทธิ์

- ประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์
- $N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)
- α คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)
- e คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
- T_0 คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.140) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi a k} \right] \quad (2.142)$$

เอาสมการที่ (2.141) คูณกับสมการที่ (2.142) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.143)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.144)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi k}}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.145)$$

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

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.146)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.145) ลงในสมการที่ (2.144) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^2 k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^2 \quad (2.147)$$

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^2 \quad (2.148)$$

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

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{1/4} \quad (2.149)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.150)$$

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

$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^2 \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^3 \quad (2.151)$$

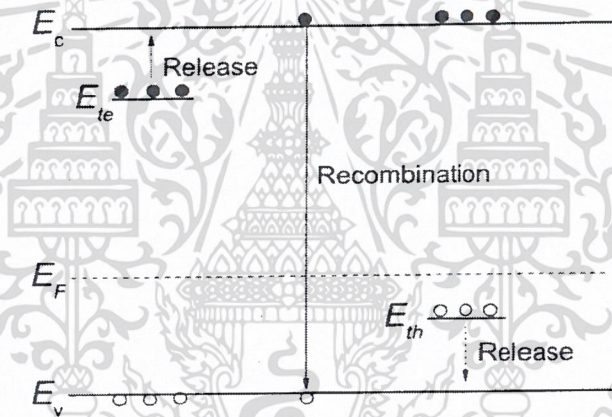
โดยที่ N_d คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพหุคูณของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน $\frac{N_d}{N_a} = k$ และ $k < 1$ เสมอ

2.11 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อร้อน (งามนิตย, 2556; รุติณัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.26 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วน

เอกสารนี้อิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ โฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อยสารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการ กระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสงแต่บางครั้งพบว่ากับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนหรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มาก เพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลาานกว่ากลไกการรวมตัว แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลาที่ยาวนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อ (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.26 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดง ถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.152)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.153)$$

แทนสมการที่ (2.151) ลงในสมการที่ (2.152) จะได้

$$I = e\mu n_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.154)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกักตักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.155)$$

แทนสมการที่ (2.153) ลงในสมการที่ (2.154) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.156)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.157)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.158)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.157) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) (nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \quad (2.159)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักตักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)\right) \quad (2.160)$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.161)$$

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 เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามามีส่วนร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.162)$$

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

เมื่อ

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

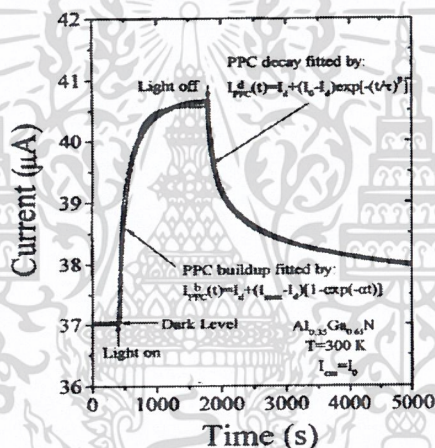
เอกสารนี้ ดังนั้น $E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} = (0.086)(\text{ความชัน})$ อิเล็กตรอนโวลต์ (2.163) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีจันจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.164)$$

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

$$I_p = I_o' \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.165)$$



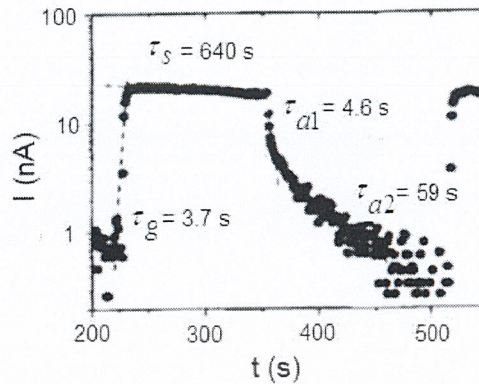
รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของ ค่าสภาพนำ ไฟฟ้าเชิงแสงคือรีจัน

จากสมการที่ (2.163) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o' - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.166)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.28) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.159) และสมการที่ (2.163) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.167)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.166) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.168)$$

จากสมการที่ (2.167) สามารถที่จะหาค่า σ_{i1} และ σ_{i2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.168) ดังนี้คือ

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.169)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.170)$$

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

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.171)$$

และ

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.172)$$

สมการที่ (2.167) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right)^\beta \right] \quad (2.173)$$

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}} \right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.174)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.174) และ (2.167) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.175)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากสมการที่ (2.175) สามารถที่จะหาค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.176)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.177)$$

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

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.178)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.179)$$

สมการที่ (2.175) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.180)$$

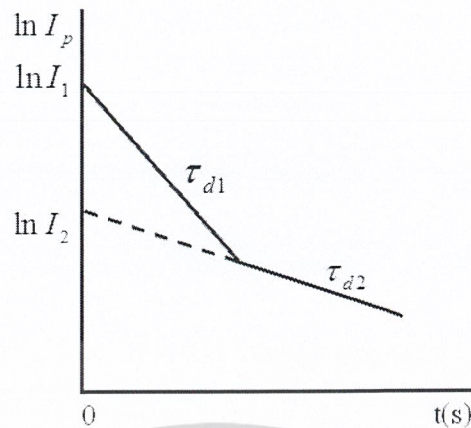
ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิเคราะห์ของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2''' \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \right] \quad (2.181)$$

2.11.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.182)$$

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

$$\sigma_{i1} = \frac{\ln I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.183)$$

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

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.184)$$

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

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.185)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเมตเซรามิก ก็สามารถใช้สูตรไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

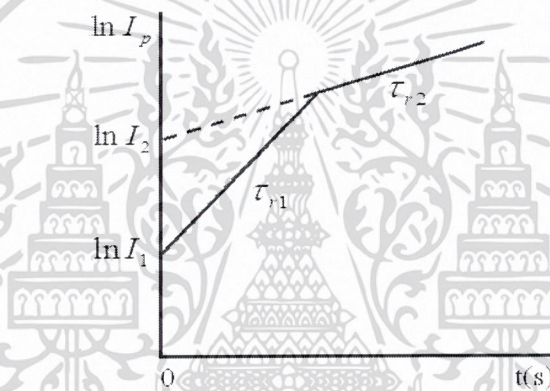
$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.186)$$

และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.187)$$

2.11.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.30



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

กระแสชาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.188)$$

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

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

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -\frac{t}{\tau_r} \quad (2.189)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.190)$$

ข้อสังเกตคือสมการ $\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -t/\tau_r$ จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้ได้เช่นเดียวกับกระแสขา

2.12 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Space Sublimation: CSS) (ฐิตินัย, 2556)

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับตั้งสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right) = K_p(T) \quad (2.192)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$ คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ

ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.193) หรือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบบ์

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

แคลอรีต่อโมล

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

$$K_p(T_{SO}) = P \left(\frac{Cd}{CdTe} \right) (T_{SO}) P^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Te_2}{CdTe} \right) (T_{SO}) = \exp \left[\frac{-\Delta G}{RT_{SO}} \right] \quad (2.194)$$

$$K_p(T_{sub}) = P \left(\frac{Cd}{CdTe} \right) (T_{sub}) P^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Te_2}{CdTe} \right) (T_{sub}) = \exp \left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}} \right] \quad (2.195)$$

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

$$J_{Cd,j} = \frac{D_{Cd,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Cd}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv J \quad (2.196)$$

$$J_{Te_2,j} = \frac{D_{Te_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Te_2}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.197)$$

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

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

J คือ พลັกซ์ของการแพร่

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{P_{Te_2}(T_{SO})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad (2.198)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้น สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR \left(\frac{\mu m}{min} \right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.199)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

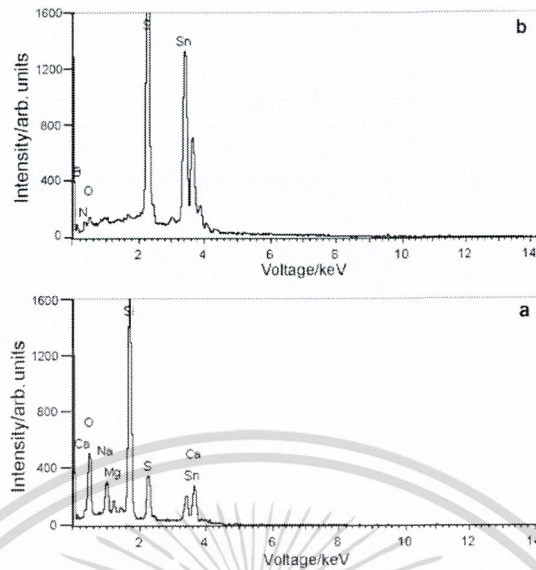
ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Chengwu Shi , 2013)

ในปัจจุบันมีการรายงานวิธีต่างๆ ในการเตรียมฟิล์มดีบุกไดซัลไฟด์เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ วิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเป็นตัวอย่างรายงานที่มีประสิทธิภาพ และเป็นเทคนิคการสะสมของฟิล์มบางแบบไม่เปียก การวิจัยในปัจจุบันมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแนวทางในการเตรียมฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์โดยใช้ดีบุกไดซัลไฟด์เป็นสารตั้งต้น โดยเทคนิคการระเหิดสารเคมีระยะประชิด ฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์เตรียมที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส แสดงลักษณะเฉพาะของแนวระนาบ(001) ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Sn_2S_3 กับเฟสอื่นๆ และแสดงผลึกดีบุกไดซัลไฟด์เป็นลักษณะเฉพาะในแนวระนาบ (001) ดังนั้นพบว่าอุณหภูมิตั้งต้นที่เหมาะสมในการเตรียมสารของฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์คือ 580 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด แนะนำให้ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประสิทธิภาพและใช้ฟิล์มบางนี้ในเซลล์แสงอาทิตย์

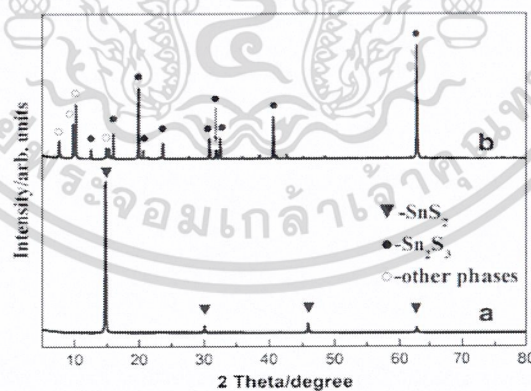
จากรูปที่ 2.31 แสดงสเปกตรัม EDX ของฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์ที่แหล่งอุณหภูมิ 2 แหล่งแตกต่างกัน ความแปรผันของอัตราส่วนอะตอม ดีบุก จากการคำนวณแสดงในตารางกราฟ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนอะตอมระหว่างดีบุกถึงซัลเฟอร์ ในฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์เป็น 1:2.07 และ 1:1.54 ที่แหล่งอุณหภูมิ 580 °C และ 650 °C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แสดงสเปกตรัม EDX ของฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากอนุหุมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 และ 650 องศาเซลเซียส

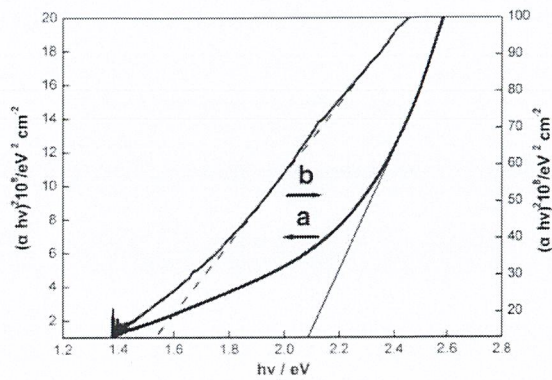
รูปที่ 2.32 แสดงรูปภาพที่ได้จาก XRD ของฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียมจากอนุหุมิ 650 °C ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Sn_2S_3 พร้อมกับระยะอื่นๆ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสลายตัวของดีบุกไดซัลไฟด์เกิดที่อุณหภูมิ 650 °C ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะว่าที่อุณหภูมิ 580 °C เหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 2.32 แสดงรูปภาพที่ได้จาก XRD ของฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ

a . 580 องศาเซลเซียส b. 650 องศาเซลเซียส

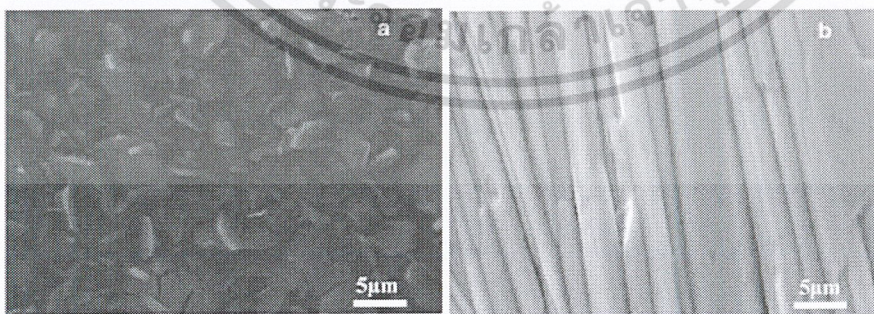
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ที่เตรียมได้จาก อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 และ 650 องศาเซลเซียส

รูปที่ 2.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ซึ่งจุดตัดแกน hv ของกราฟจะได้ค่า ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง SnS₂ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของแผ่น ฐานรองรับ 580 องศาเซลเซียสมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.08 eV สูงกว่า กรณีที่ใช้อุณหภูมิ ของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.53 eV

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของภาพตัดขวางของฟิล์มบาง SnS₂ จะแสดงดังรูปที่ 2.34 พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นแผ่นเพราะดีบุกไดซัลไฟด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเหมือนกับ แคดเมียมไอโอไดด์ส่งผลให้เกิดการยึดกันของชั้นดีบุกไดซัลไฟด์โดยแรงแวนเดอร์วาลส์ กรณีที่เตรียม ด้วยอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นแท่ง ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ผลึก ความหนาของฟิล์มบางดีบุกไดซัลไฟด์ซึ่งเตรียมไว้ที่อุณหภูมิต่างกันของ 580 °C และ 650 °C มีค่า เท่ากับ 0.54 และ 2.26 μm ตามลำดับ



รูปที่ 2.34 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางที่เตรียมได้ จากอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส (ก.) และ 650 องศาเซลเซียส (ข.)

ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแอนติโมนีซัลไฟด์ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 550-570 องศาเซลเซียส

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (งามนิตย, 2531; งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

- 1) แผ่นกระจกสไลด์
- 2) ที่ตัดกระจก
- 3) เครื่องอัลตราโซนิก
- 4) เครื่องเป่าลมร้อน
- 5) เตาอบ
- 6) ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
- 7) สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปัสสาวะ อะซิโตนและ เอทานอล)
- 8) นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

- 1) ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล้องแกรไฟต์
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทั้งสแตน 1,000 วัตต์
- 2) ผงผลึกแอนติโมนีซัลไฟด์ บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3) เครื่องชั่ง 4) ตักแห้งยี่ห้อ Sartorius ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ 4) ปักคิบบังห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 โดยที่จะวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ Quanta รุ่น FEI 250 โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-2600 โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1400 นาโนเมตร

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

- 1) นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
- 2) ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
- 3) ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
- 4) ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
- 5) ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิค
- 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

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3)

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสาร Sb_2S_3

มวลอะตอมของธาตุ Sb และ S มีค่าเท่ากับ 121.75 และ 32.06 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ } Sb_2S_3 = (121.75)(2) + (32.06)(3) = 339.68 \text{ กรัมต่อโมล}$$

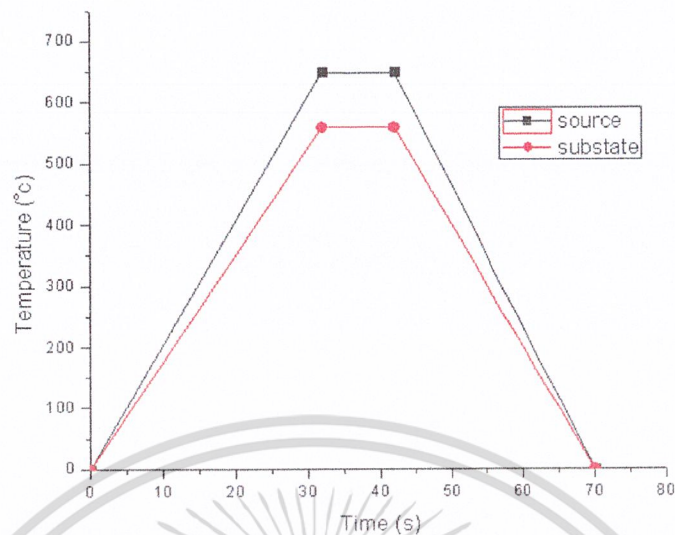
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) โดยใช้สารแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) เป็นสารตั้งต้น ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งสารตั้งต้น Sb_2S_3 ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
- 2) นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
- 3) ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
- 4) ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 10 นาที
- 5) นำอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 10 นาที
- 6) เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4
- 7) เมื่อปลูกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงมาต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
- 8) เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
- 9) สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
- 10) นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าสมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที



รูปที่ 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5402 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ Quanta รุ่น FEI 250 โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,500 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนติโมนีซัลไฟด์ (Sb_2S_3) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการส่งผ่าน การดูดกลืน และการหักเหของแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสซิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-2600 โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1400 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ความสามารถในการโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน หาสภาพนำไฟฟ้าทางแสงเชิงซ้อน ค่าการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร ค่าการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิว และค่าพารามิเตอร์ทางแสง โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว แบบจำลองเซลไมเออร์และแบบจำลองสปิตเซอร์-แพน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมไปทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดอิมพีแดนซ์ ศึกษาการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303 – 473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

1. ต่อดวงจรมัดและใช้โปรแกรมร่วมกับ โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ โดยที่ความชัน คือ $1/R$
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 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดอิมพีแดนซ์

อิมพีแดนซ์ (สัญลักษณ์ Z) คือค่ารวมทั้งหมดที่ต้านกระแสในวงจร หรืออาจเรียกว่าเป็นสิ่งที่ขัดขวางการไหลของกระแส มันคล้ายกับความต้านทานแต่ไม่เหมือนทีเดียว เพราะต้องคำนึงถึงผลกระทบของความจุและการเหนี่ยวนำด้วย อิมพีแดนซ์มีหน่วยวัดเป็นโอห์ม สัญลักษณ์คือ Ω ค่า อิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ มีปริมาณทางไฟฟ้าสี่ตัวที่เป็นสิ่งกำหนดอิมพีแดนซ์ (Z) ของ วงจรคือ ความต้านทาน (R), ความจุ (C), ความเหนี่ยวนำ (L) และ ความถี่ (f)

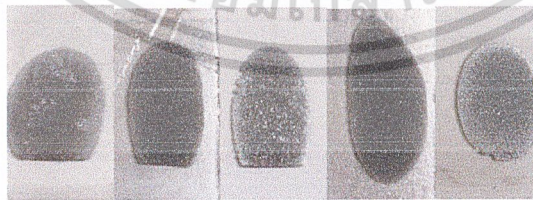
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่ให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์

4.1 สัณฐานวิทยาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้นมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนได้แม้ทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ แต่เมื่อให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเกิน 570 องศาเซลเซียส จะทำให้สารตั้งต้นหลอมเหลวติดกับกล่องกราไฟต์



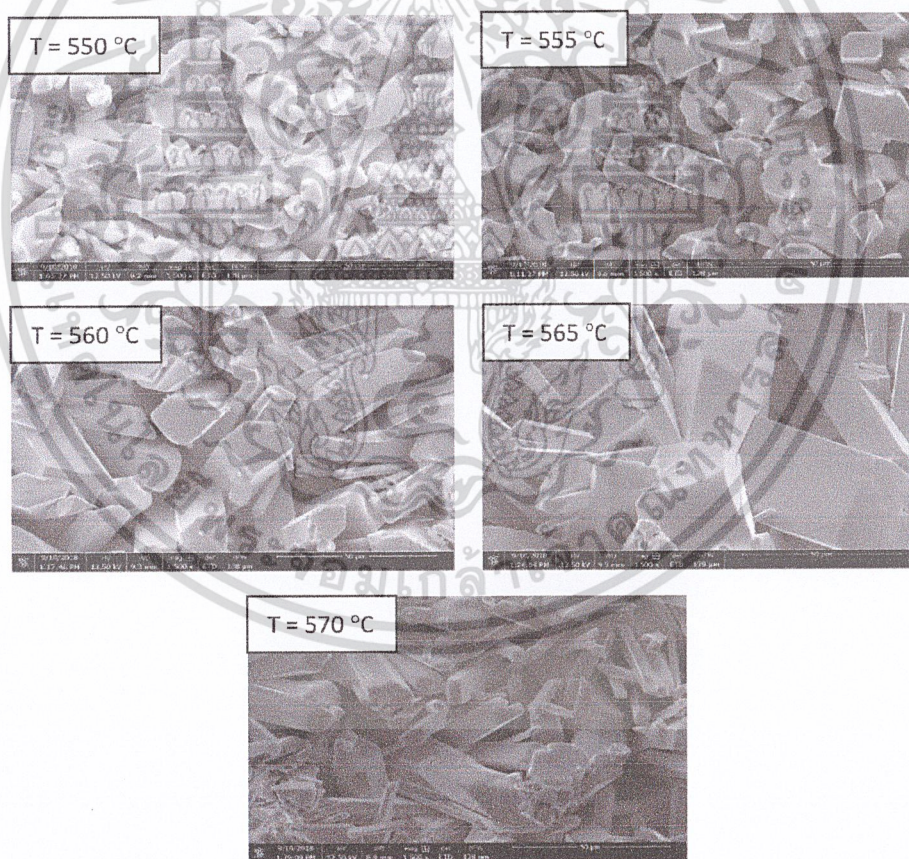
รูปที่ 4.1 แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



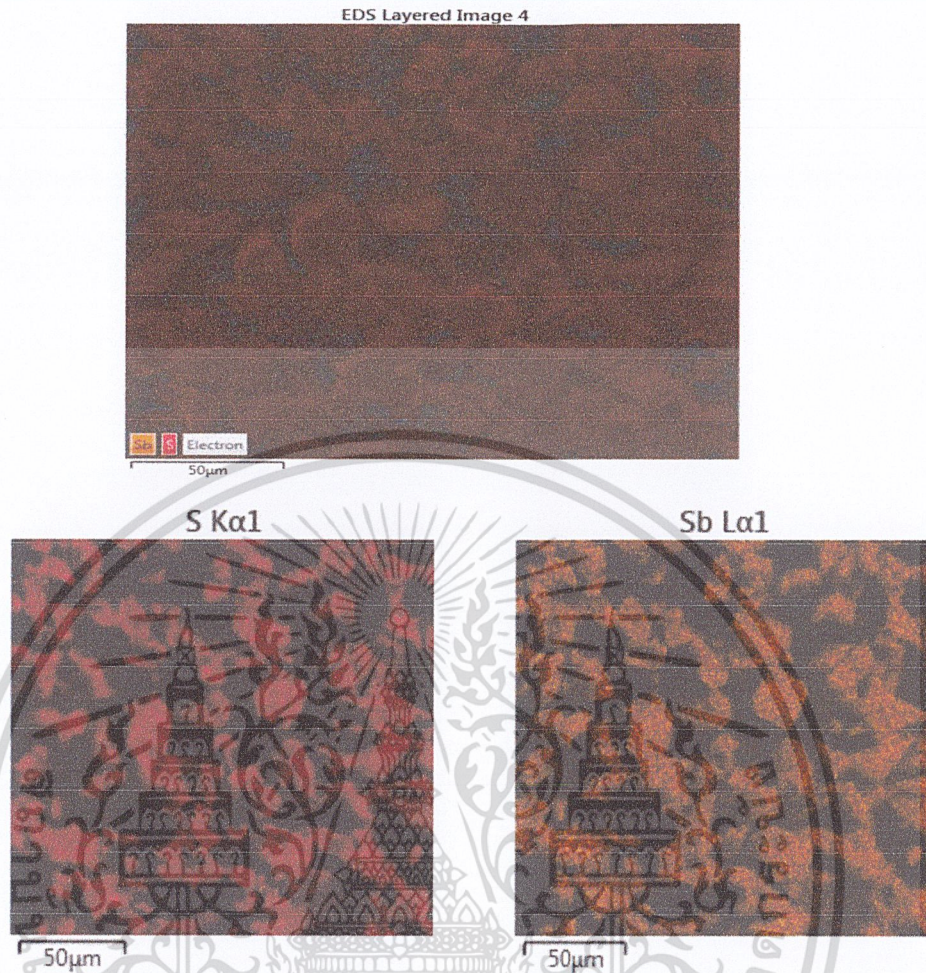
รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



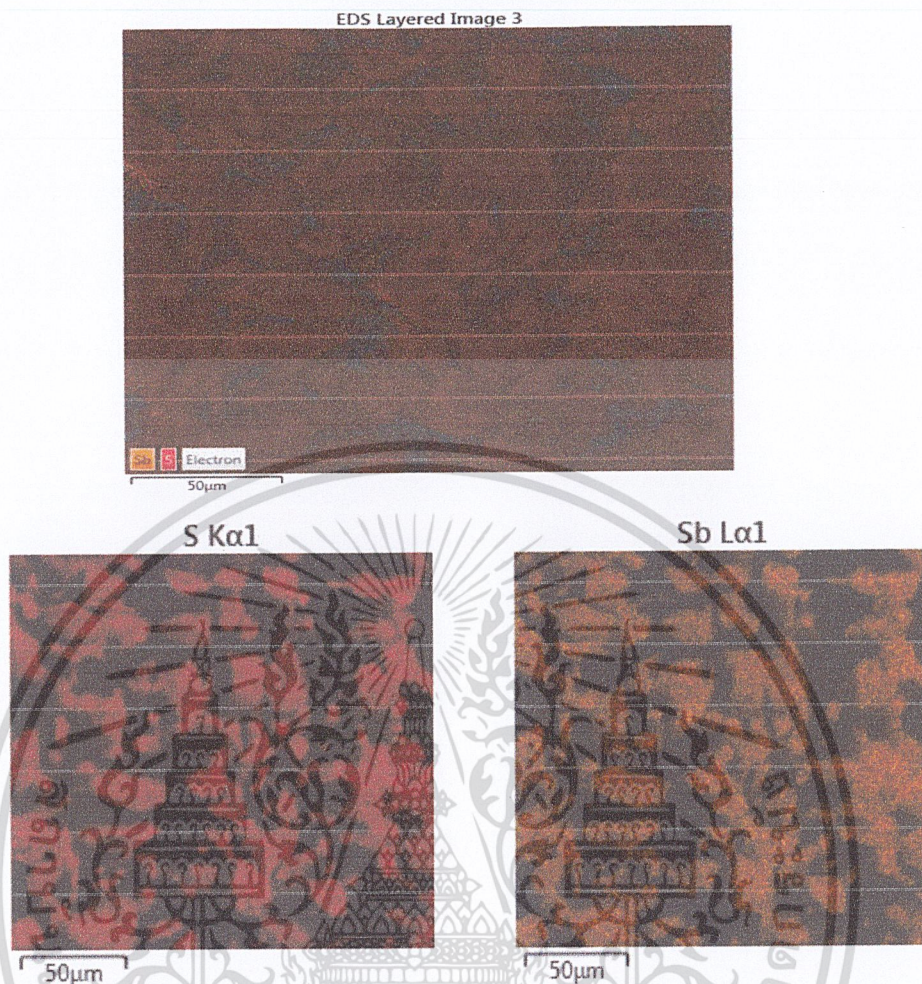
รูปที่ 4.3 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



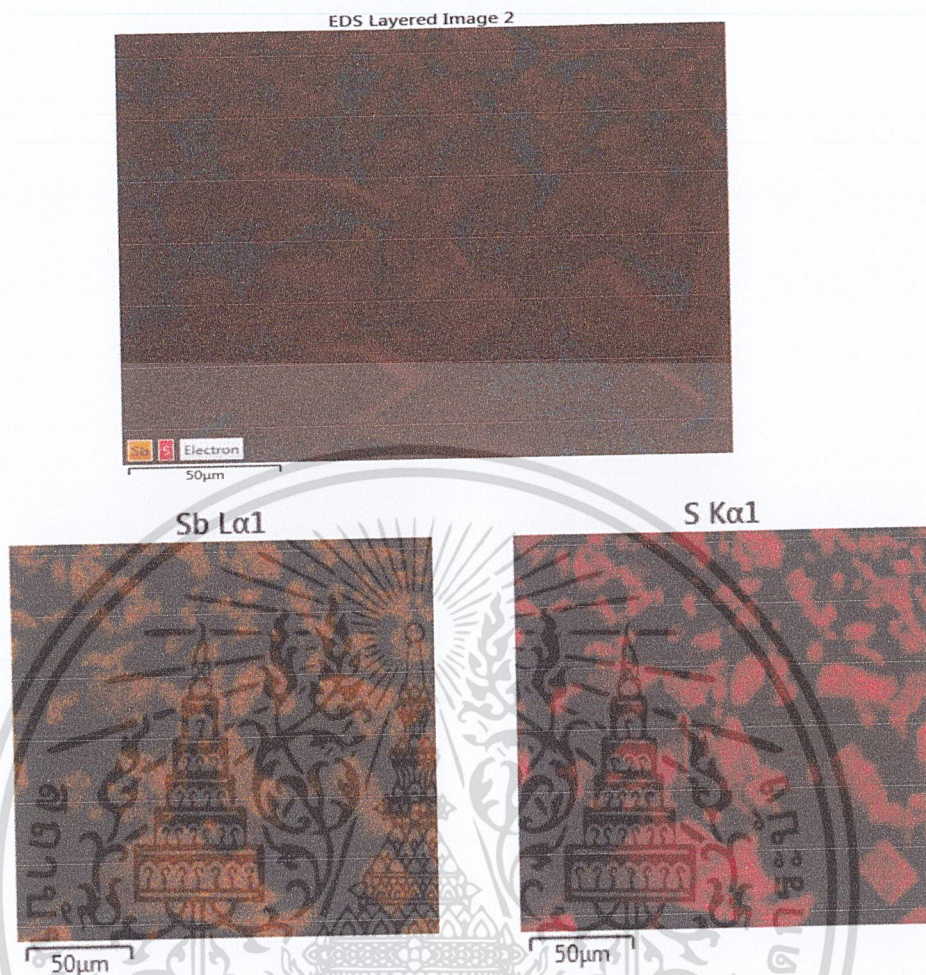
รูปที่ 4.4 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 555 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



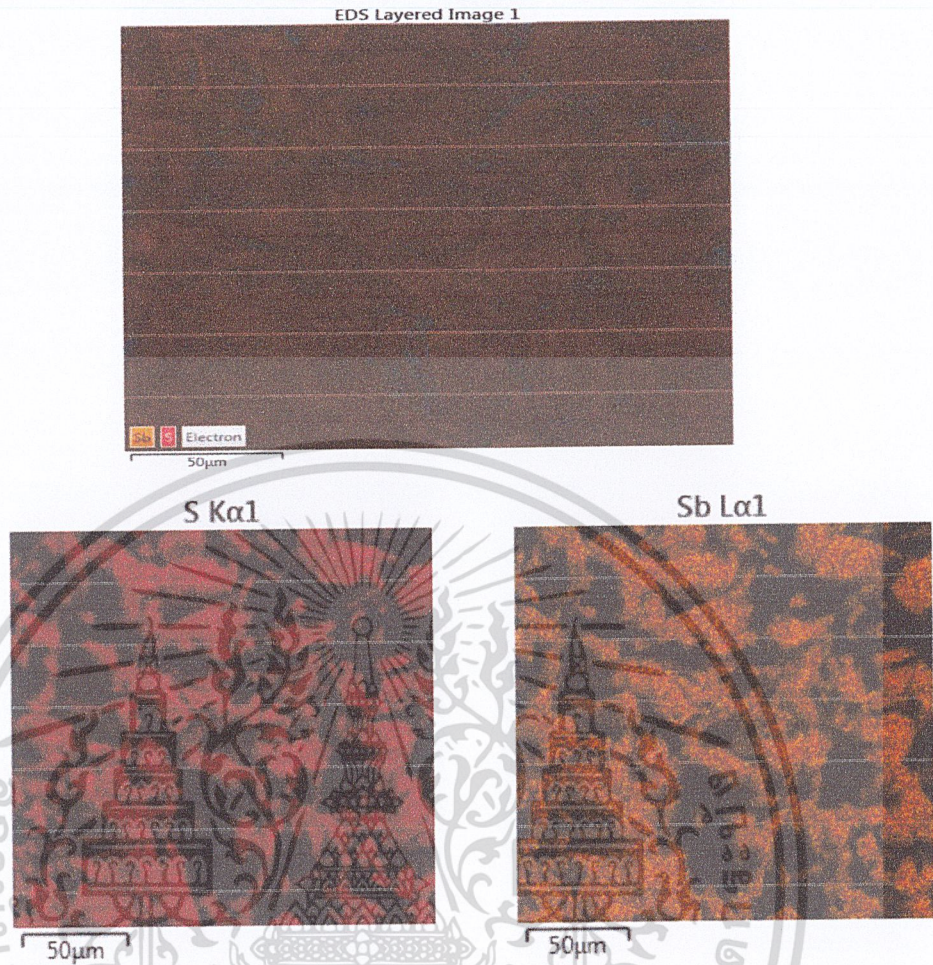
รูปที่ 4.5 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 560 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

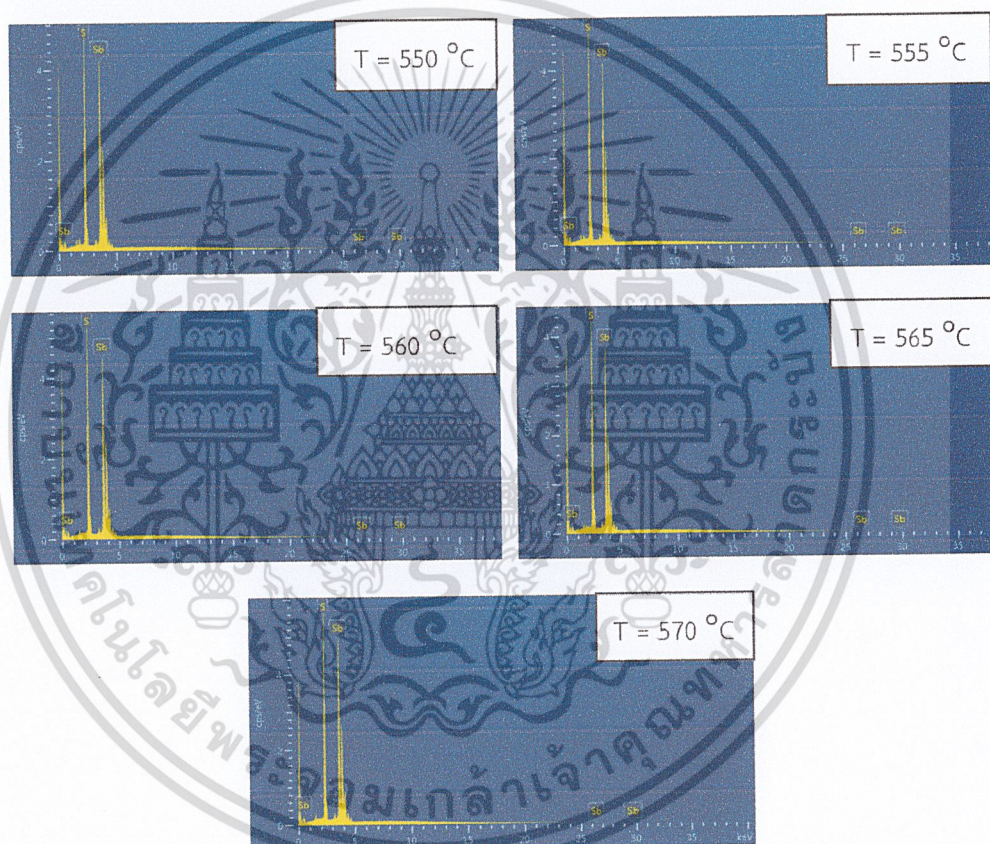


รูปที่ 4.7 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 570 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดด้วย (EDS Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เป็นการระบุชนิด และปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที

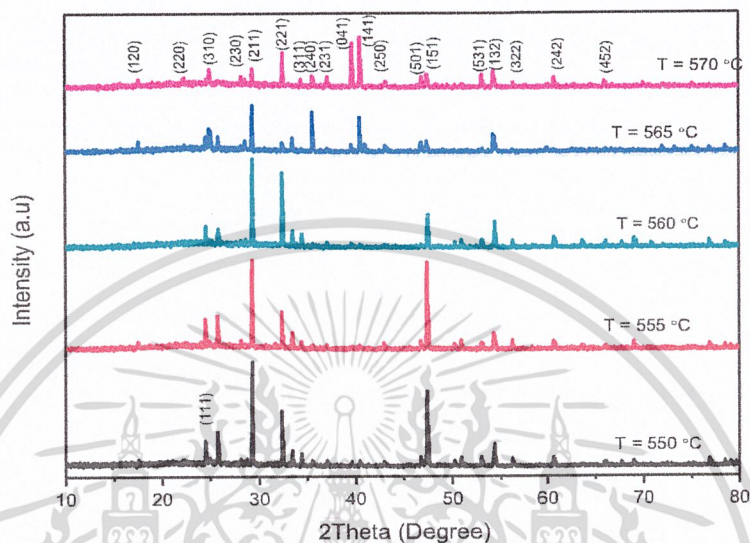
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | Weight (%) | | Atomic (%) | |
|-------------------------------|------------|-------|------------|-------|
| | Sb | S | Sb | S |
| 550 | 72.44 | 27.56 | 40.91 | 59.09 |
| 555 | 71.86 | 28.14 | 40.21 | 59.79 |
| 560 | 71.66 | 28.34 | 39.97 | 60.03 |
| 565 | 72.04 | 27.96 | 40.42 | 59.58 |
| 570 | 72.12 | 27.88 | 40.52 | 59.48 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | 2θ | (h, l, k) | Lattice Constant (\AA) | | | Volume (\AA^3) |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------|-------|---------------------------|
| | | | a | b | c | |
| 550 | 24.886 | (130) | 11.262 | 11.298 | 3.830 | 487.45 |
| | 25.763 | (111) | | | | |
| | 29.274 | (211) | | | | |
| | 32.374 | (221) | | | | |
| | 47.376 | (151) | | | | |
| 555 | 24.886 | (130) | 11.248 | 11.297 | 3.832 | 487.07 |
| | 25.750 | (111) | | | | |
| | 29.275 | (211) | | | | |
| | 32.376 | (221) | | | | |
| | 47.377 | (151) | | | | |
| 560 | 25.082 | (111) | 11.290 | 11.280 | 3.858 | 487.92 |
| | 29.326 | (211) | | | | |
| | 35.575 | (240) | | | | |
| | 40.378 | (141) | | | | |
| | 54.198 | (132) | | | | |
| 565 | 24.886 | (130) | 11.147 | 11.283 | 3.840 | 483.00 |
| | 29.328 | (211) | | | | |
| | 32.427 | (221) | | | | |
| | 47.451 | (151) | | | | |
| | 54.198 | (132) | | | | |
| 570 | 29.337 | (211) | 11.167 | 11.320 | 3.838 | 485.22 |
| | 32.352 | (221) | | | | |
| | 39.546 | (041) | | | | |
| | 40.378 | (141) | | | | |
| | 54.198 | (132) | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ระบุาบบผลึกที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก คือระนาบ(211) ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

และ

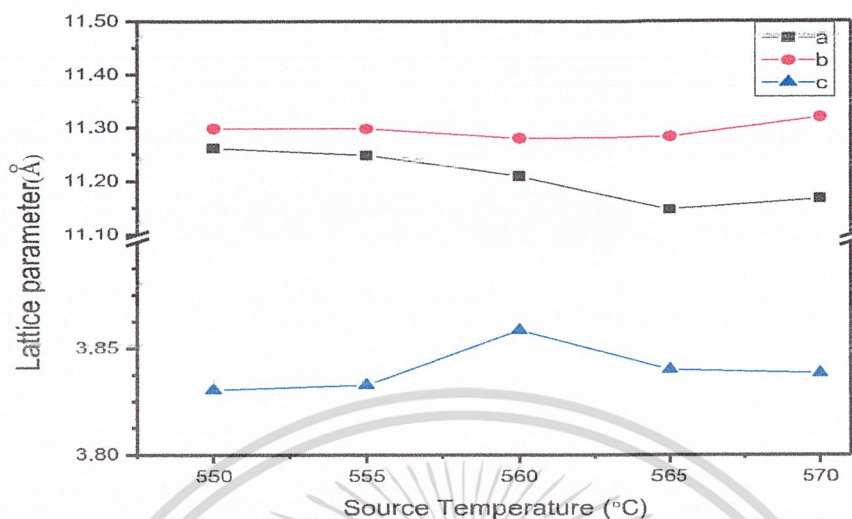
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

สัมประสิทธิ์ของการจัดเรียงระนาบ (texture coefficient) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

เมื่อ N คือจำนวนพีคที่ปรากฏ $I_{measure}$ คือความเข้มของพีคที่วัดได้ จากเครื่องเอกซเรย์ และ $I_{standard}$ คือ ความเข้มของพีคตามมาตรฐาน JCPDS 42-1393

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a, b และ c กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที

สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ

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

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

อีกทั้ง ขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพีคของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธีวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาผลของค่าความเครียดของสารตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ D คือ ค่าขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

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

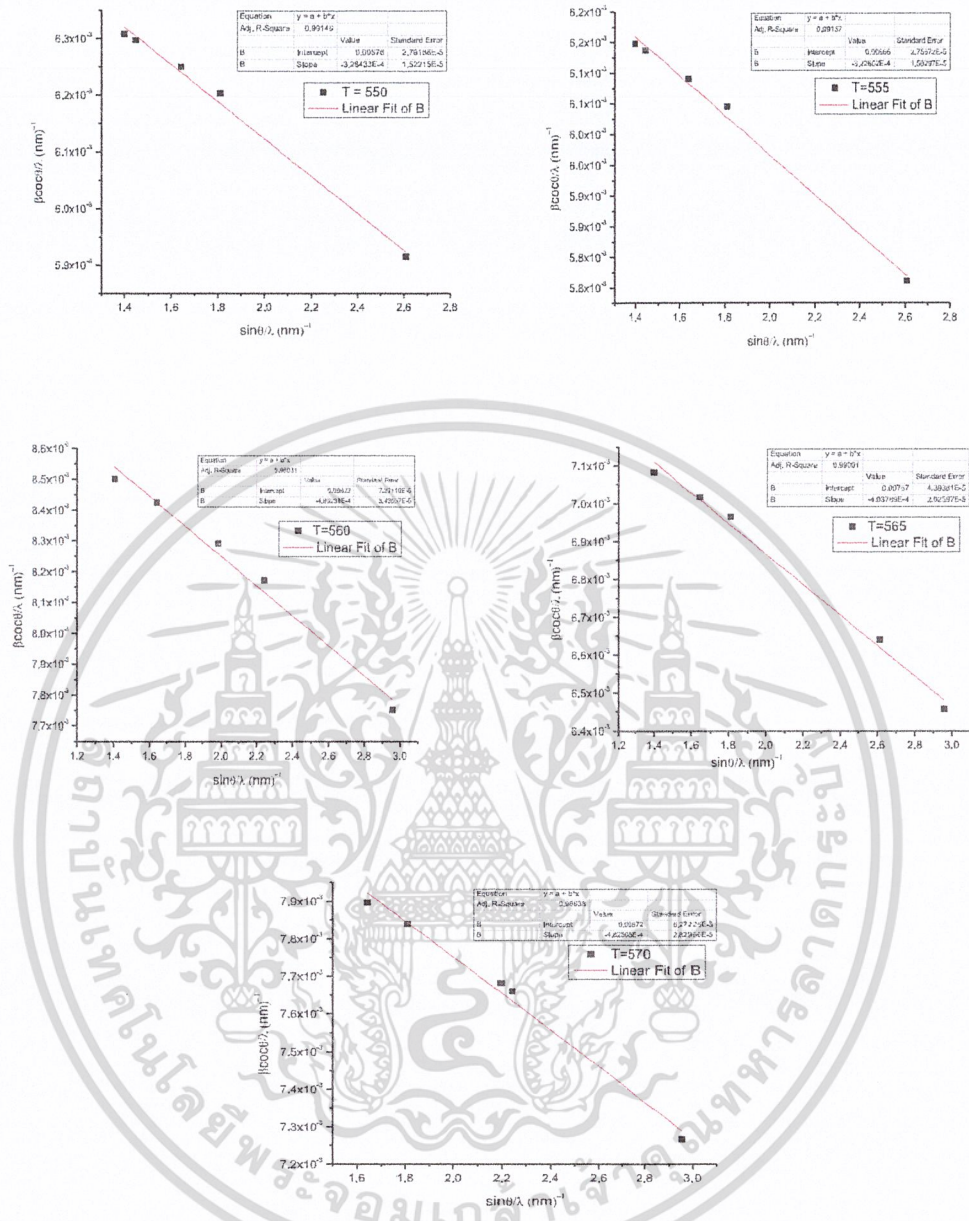
ε คือ ค่าความเครียด

เมื่อทราบค่า β , θ และ λ จากผลการทดลองก็สามารถคำนวณหาค่า ε ได้

ส่วนความหนาแน่นดิสโลเคชัน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\text{Dislocation density} = \frac{1}{D^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

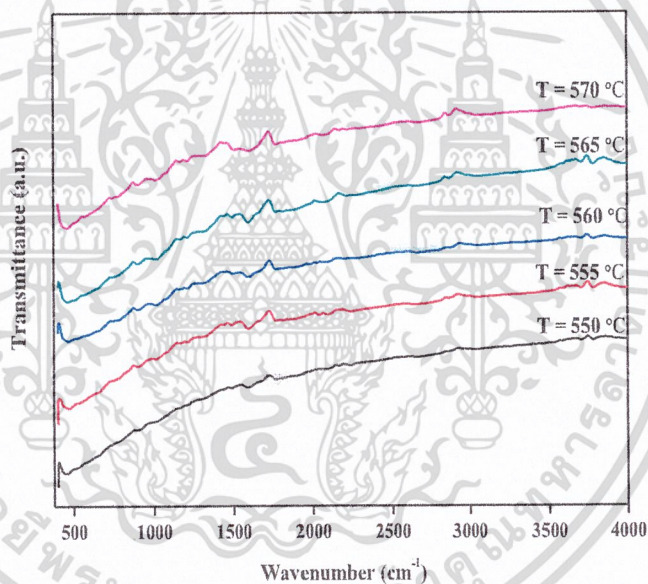
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | (h, l, k) | 2θ | Texture Coefficient | FWHM (radian) (10^{-4}) | Grain Size from XRD (nm) | Dislocation Density (line/m ²) | Strain (ϵ) |
|-------------------------|-----------|-----------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|--|-----------------------|
| 550 | (111) | 25.763 | 1.405 | 9.94 | 138.6 | 5.21×10^{13} | 8.21×10^{-5} |
| | (211) | 29.274 | 1.153 | | | | |
| | (221) | 32.374 | 0.735 | | | | |
| | (151) | 47.376 | 2.395 | | | | |
| 555 | (111) | 25.750 | 1.460 | 9.77 | 141.1 | 5.02×10^{13} | 8.06×10^{-5} |
| | (211) | 29.275 | 0.999 | | | | |
| | (221) | 32.376 | 0.558 | | | | |
| | (151) | 47.377 | 2.973 | | | | |
| 560 | (111) | 25.082 | 1.823 | 13.4 | 101.9 | 9.63×10^{13} | 1.21×10^{-4} |
| | (211) | 29.326 | 1.023 | | | | |
| | (221) | 32.352 | 0.306 | | | | |
| | (151) | 47.391 | 0.805 | | | | |
| 565 | (111) | 25.828 | 0.936 | 11.1 | 122.5 | 6.66×10^{13} | 1.00×10^{-4} |
| | (211) | 29.328 | 1.205 | | | | |
| | (221) | 32.427 | 1.245 | | | | |
| | (151) | 47.451 | 1.449 | | | | |
| 570 | (111) | 25.727 | 0.399 | 12.5 | 107.8 | 8.61×10^{13} | 1.20×10^{-4} |
| | (211) | 29.337 | 0.246 | | | | |
| | (221) | 32.352 | 0.556 | | | | |
| | (151) | 47.423 | 0.578 | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งทำการวัดการดูดกลืนแสง (Transmittance) ที่ใช้เลขคลื่นในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร

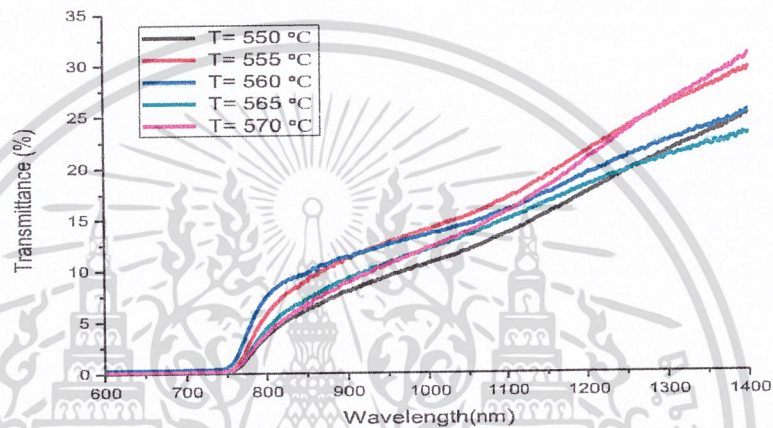


รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

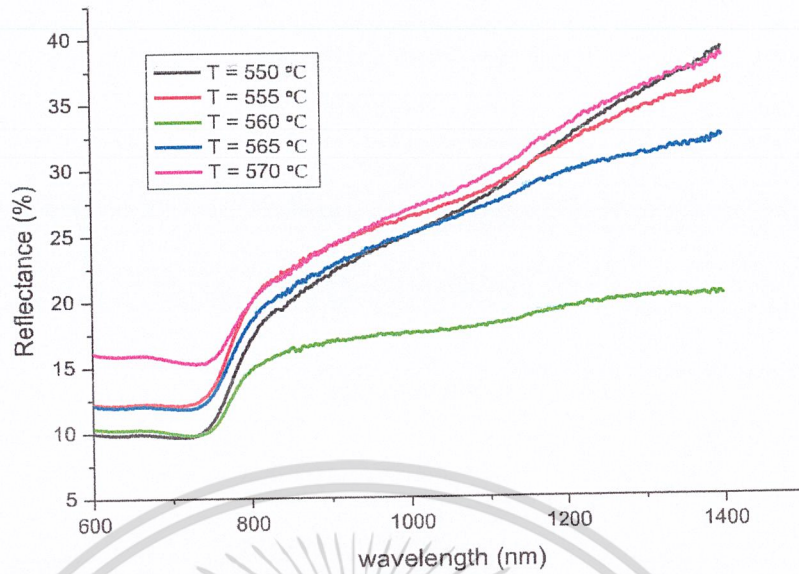
4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

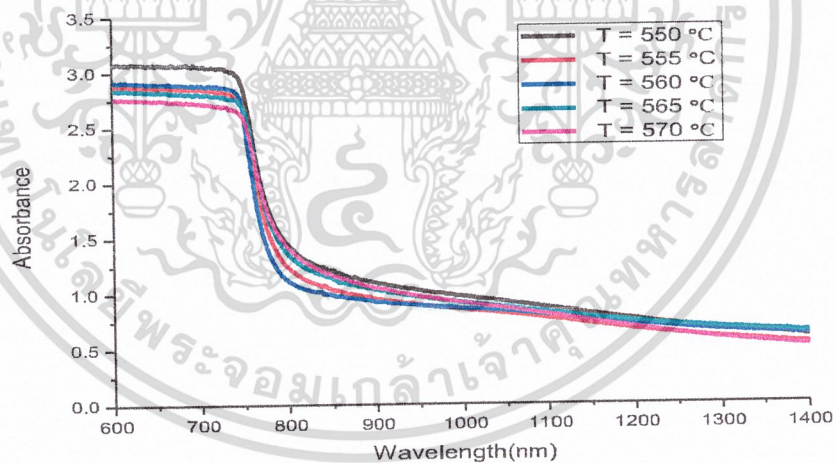


รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



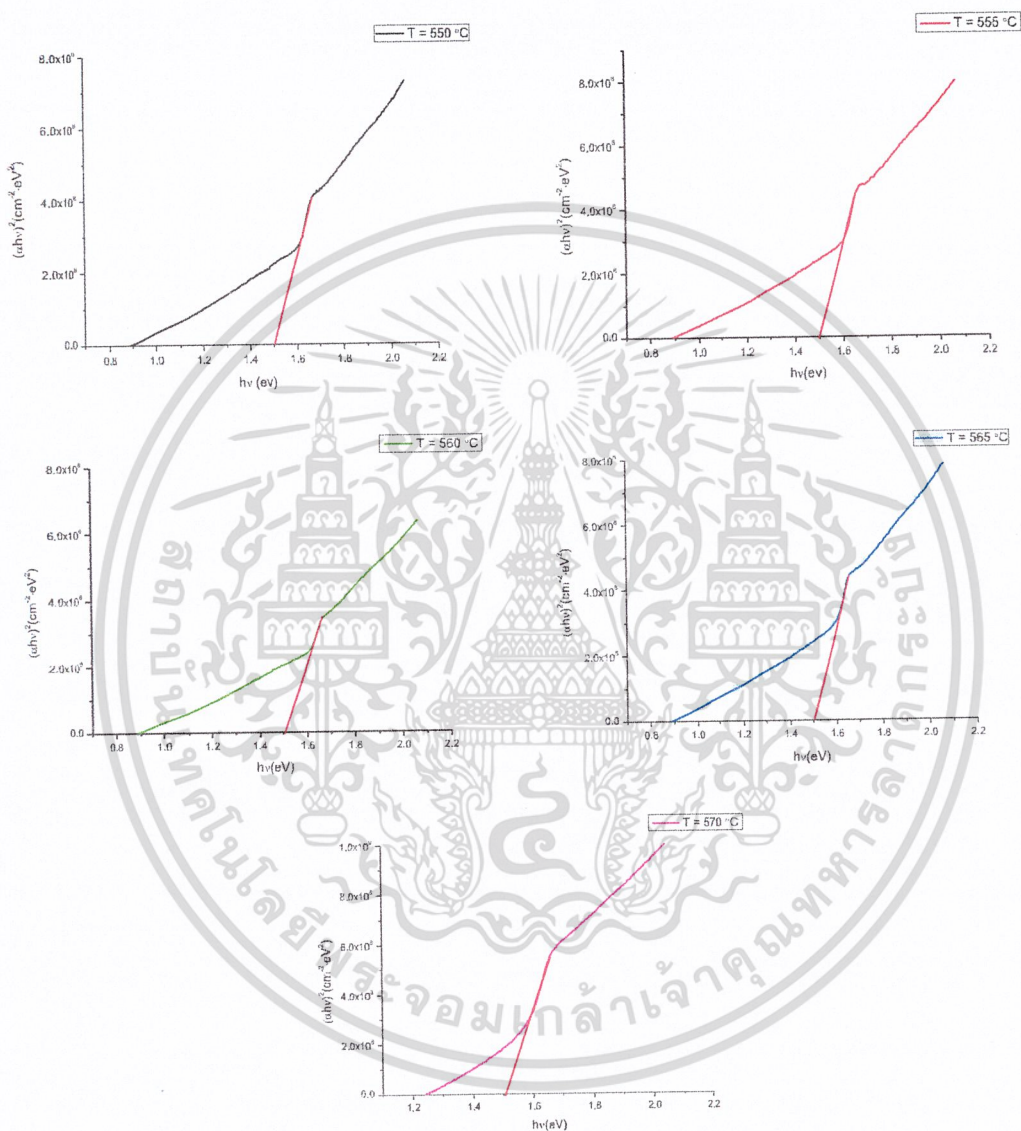
รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 เป็นการศึกษากการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ช่วงความยาวคลื่น 600-1400 นาโนเมตร ดังรูป 4.7 จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | Energy Gap (eV) |
|-------------------------|-----------------|
| 550 | 1.50 |
| 555 | 1.50 |
| 560 | 1.50 |
| 565 | 1.50 |
| 570 | 1.50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การหาค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ค่าดัชนีหักเห (n) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

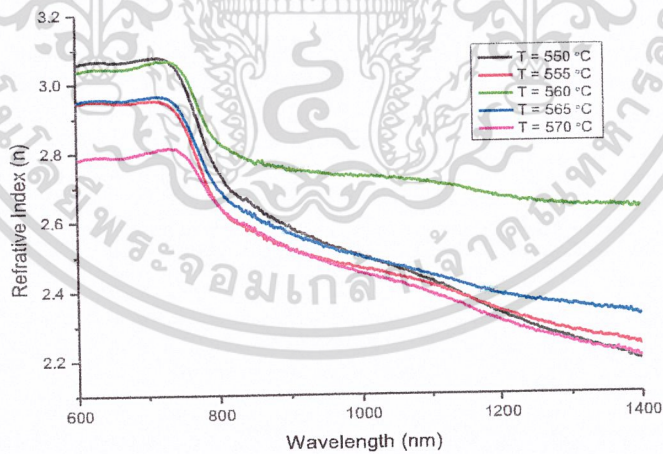
เมื่อ n_s คือ ค่าดัชนีหักเหของกระจกสไลด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.51 และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

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

จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเหของฟิล์มบาง (n^*) จะสัมพันธ์กับกับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กทริกคือ

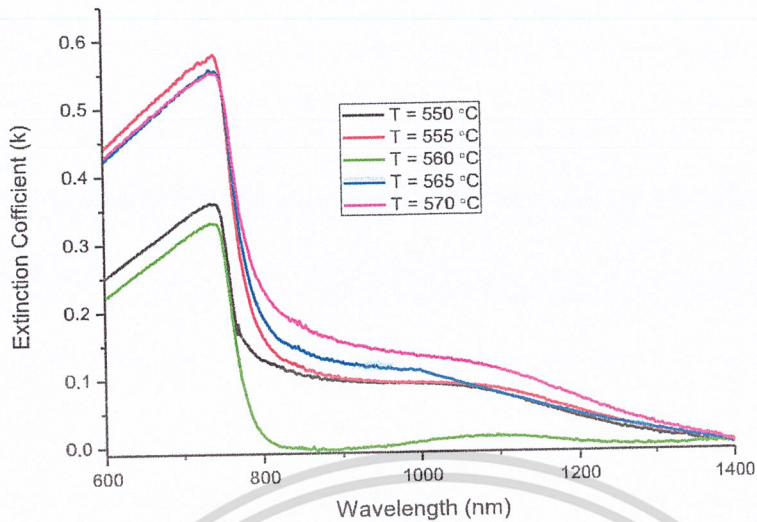
$$n^* = \sqrt{\epsilon^*}$$

$$n^* = n - ik$$



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

4.4.3 การหาค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกเชิงซ้อน (ϵ^*) แสดงได้ดังสมการ

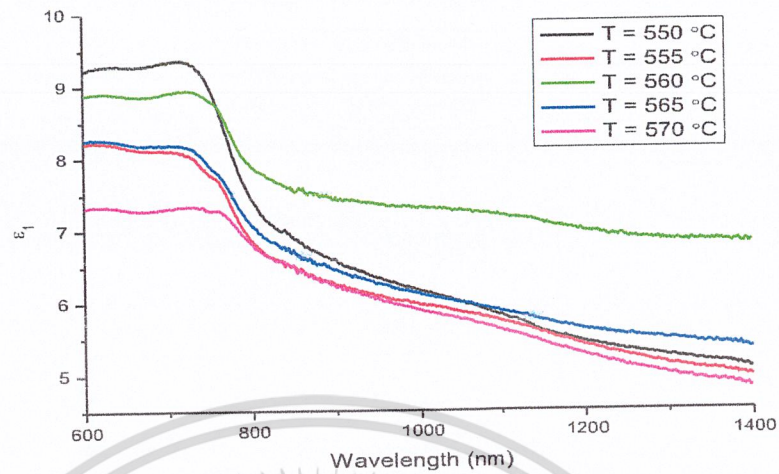
$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

โดยที่

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

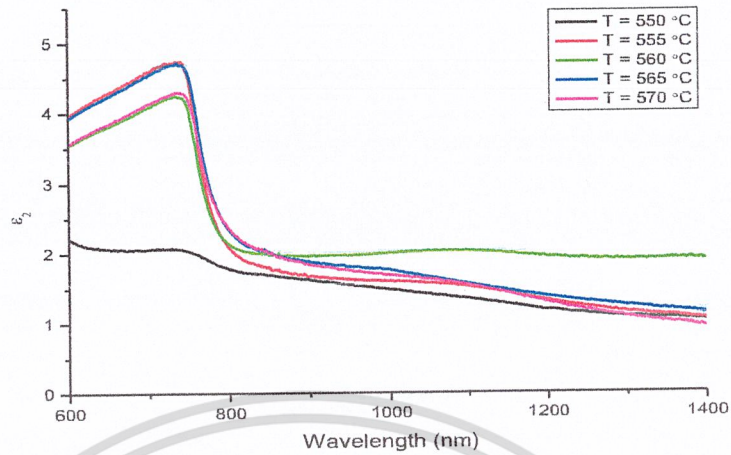
$$\epsilon_2 = 2nk$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

4.4.4 การหาค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

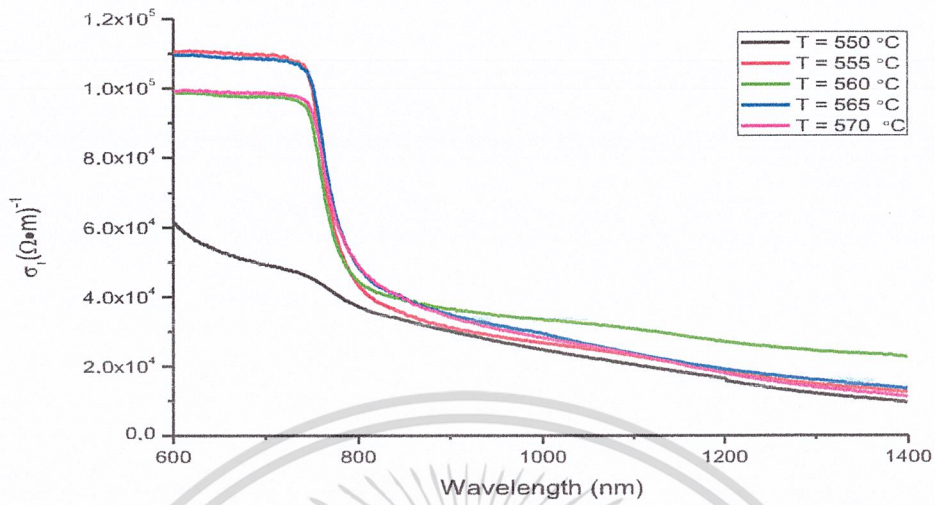
จำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำเชิงแสง (σ^*) จะนิยามดังนี้ คือ

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

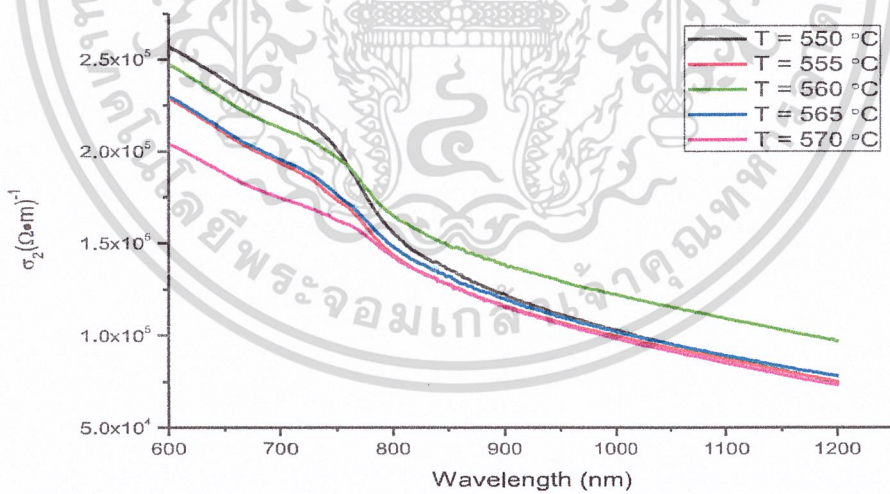
$$\sigma_1 = \omega \epsilon_2 \epsilon_0$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจินตภาพของสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารในการระเหิด 25 นาทีงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 การหาค่าฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

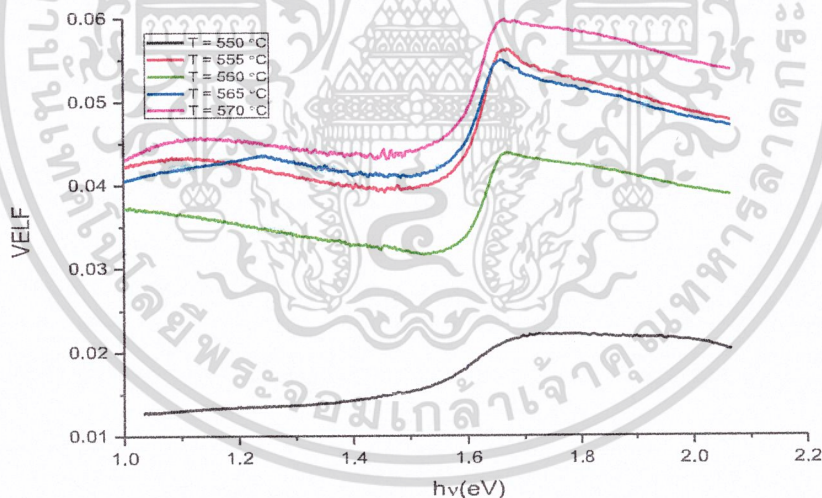
เมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านเข้าไปในฟิล์มบางพลังงานของโฟตอนจะมีการสูญเสียขณะเดินทางเข้าไปในเนื้อสาร ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตร (Volume Energy Loss Function, VELF) ดังสมการ

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

พลังงานโฟตอนจะมีการสูญเสียไปที่บริเวณพื้นผิวของฟิล์มบางจะเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันการสูญเสียเชิงพื้นผิว (Surface Energy Loss Function , SELF) ดังสมการ

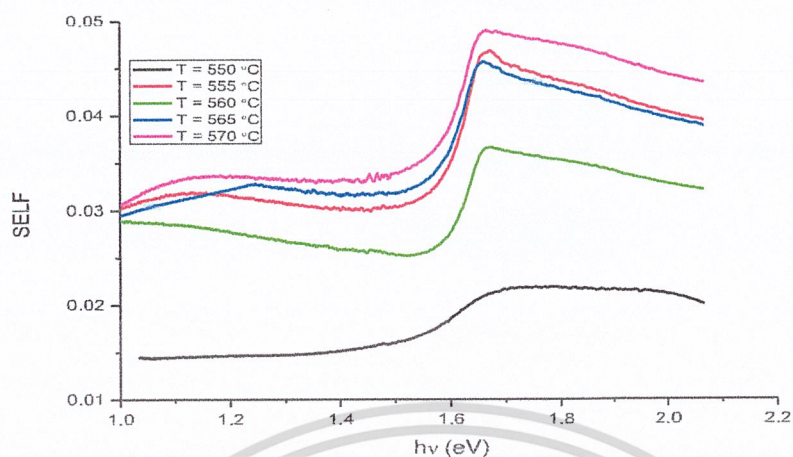
$$SELF = \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 1)^2 + \epsilon_2^2}$$

โดยปกติ VELF จะมีความมากกว่า SELF อย่างไรก็ดีทั้ง VELF และ SELF จะมีความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่พลังงานโฟตอนสอดคล้องกับ E_g

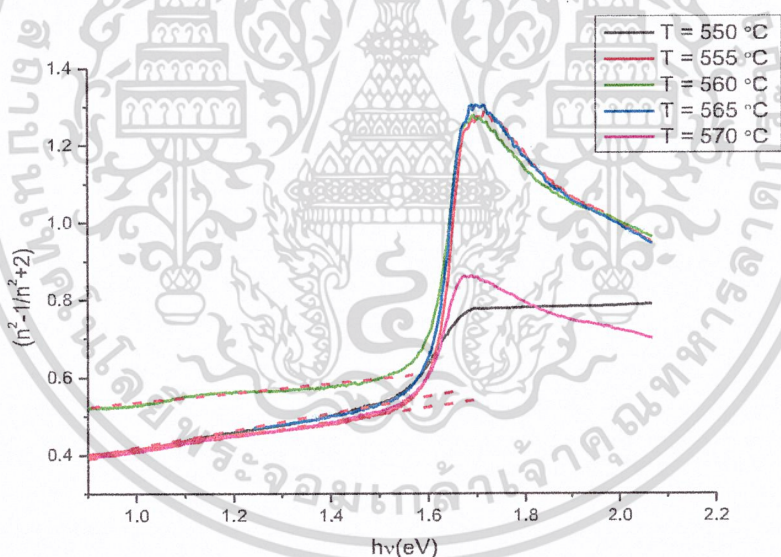


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงปริมาตรกับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูญเสียพลังงานเชิงพื้นผิวกับพลังงานแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$ กับ (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถโพลาไรซ์ของอิเล็กตรอน (electronic polarizability, α_p) คำนวณได้จาก

ความสัมพันธ์

$$\left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) = \left(\frac{4\pi N d \alpha_p}{3M} \right) + h\nu$$

จากจุดตัดแกน y จะได้ว่า

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

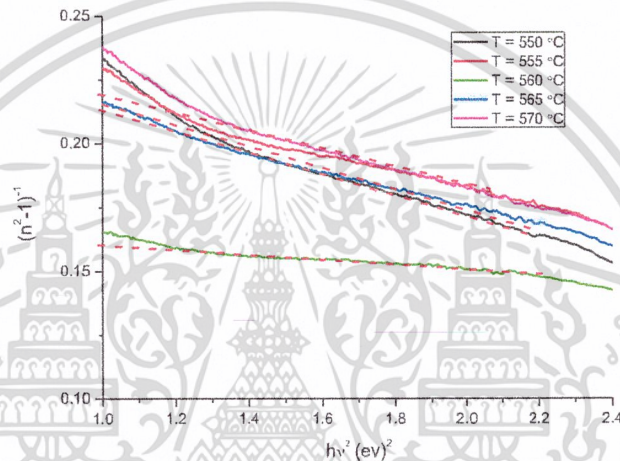
ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่ความยาวคลื่น 1250 nm.

| Source Temperature (°C) | n | k | ϵ_1 | ϵ_2 | σ_1 ($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻¹ | σ_2 ($\Omega \cdot \text{m}$) ⁻¹ | α_p |
|-------------------------|------|------|--------------|--------------|--|--|------------------------|
| 550 | 3.05 | 0.25 | 9.293 | 1.542 | 4.28×10^4 | 1.36×10^5 | 1.35×10^{-23} |
| 555 | 2.94 | 0.44 | 8.476 | 2.601 | 7.23×10^4 | 2.35×10^5 | 1.43×10^{-23} |
| 560 | 3.03 | 0.22 | 9.177 | 1.355 | 3.76×10^4 | 2.55×10^5 | 1.89×10^{-23} |
| 565 | 2.95 | 0.42 | 8.526 | 2.498 | 6.94×10^4 | 2.37×10^5 | 1.46×10^{-23} |
| 570 | 2.78 | 0.42 | 7.556 | 2.383 | 6.62×10^4 | 2.10×10^5 | 1.39×10^{-23} |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว

เวมเฟิม-โตโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึกนั้นมีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.12-4.13 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

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

หรือ

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

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.100) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

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

และ จุดตัดแกน $y = \frac{E_0}{E_d}$

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

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

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

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

N_e = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence

electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8 จำนวนการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

ตารางที่ 4.6 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ M_{-1} และ M_{-3} จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (ϵ_∞) (dielectric constant at higher wavelength) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคอสซี $n = a + (b/\lambda^2)$ เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงค่าอนันต์แล้วในพจน์ของ (b/λ^2) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (ϵ_∞) จึงมีค่าเท่ากับ a และจากสมการที่ $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรดได้

พลังงานแลตทิซ (Lattice Energy, E_l) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

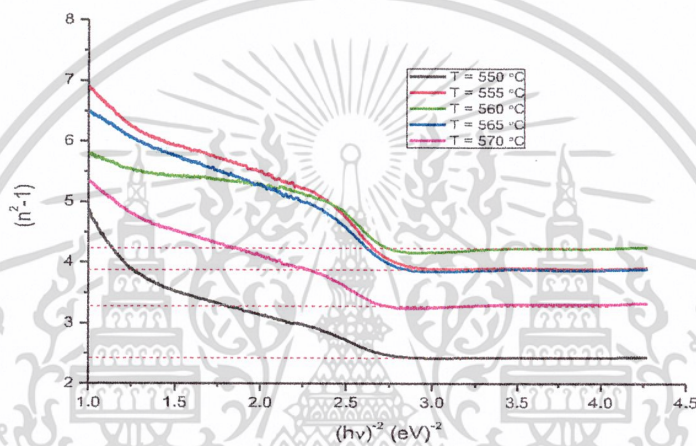
$$n^2 = 1 + \frac{E_d}{\left(E_0 - \frac{E^2}{E_0}\right)} - \frac{E_l^2}{E^2}$$

เอกสารนี้เมื่อพิจารณาที่ $E = E_0$ สมการจะกลายเป็น $n^2 = 1 + \frac{E_d}{E_0} - \frac{E_l^2}{E_0^2}$ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับพลังงานโฟตอน $(hv)^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

ค่าดัชนีหักเหสถิต (Static Refractive Index , n_0) จะหาได้จากความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.7 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประวัติโดยอาศัยแบบจำลองเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ (Sellmeier Oscillator)

โดยปกติสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่จะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ค่าดัชนีหักเหของแสงจะแสดงดังสมการ

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

เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

λ_0 คือ ความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยของทรานซิชันระหว่างแถบพลังงาน

S_0 คือ ความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์จากสมการดังกล่าวสามารถเขียนได้ในแบบของเซลไมเออร์ออสซิลเลเตอร์ดังความสัมพันธ์

เออร์ออสซิลเลเตอร์ดังความสัมพันธ์

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

หรือ

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

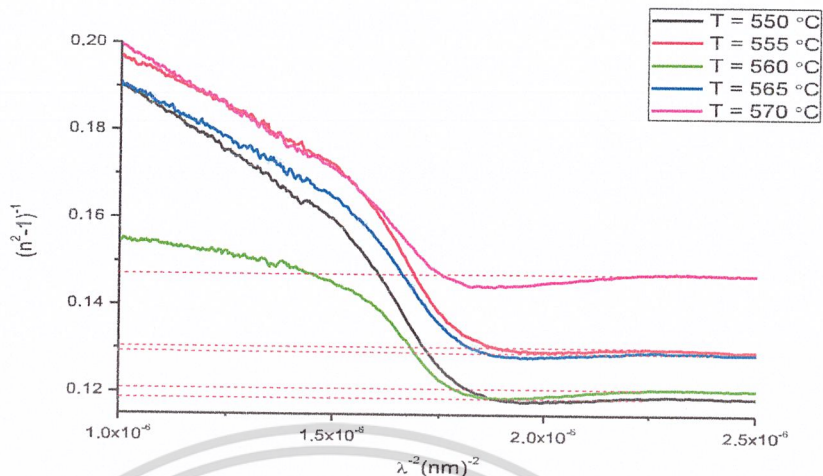
โดยที่ $slope = \frac{1}{S_0}$, จุดตัดแกน $y = \frac{1}{S_0 \lambda_0^2}$, $\lambda_0 < 500 \text{ nm}$

และ

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

n_∞ คือ ค่าดัชนีหักเหที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ $(\lambda)^{-2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

4.4.8 ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดโดยอาศัยแบบจำลองสปิตเซอร์-แฟน (Spitzer-Fanmodel)

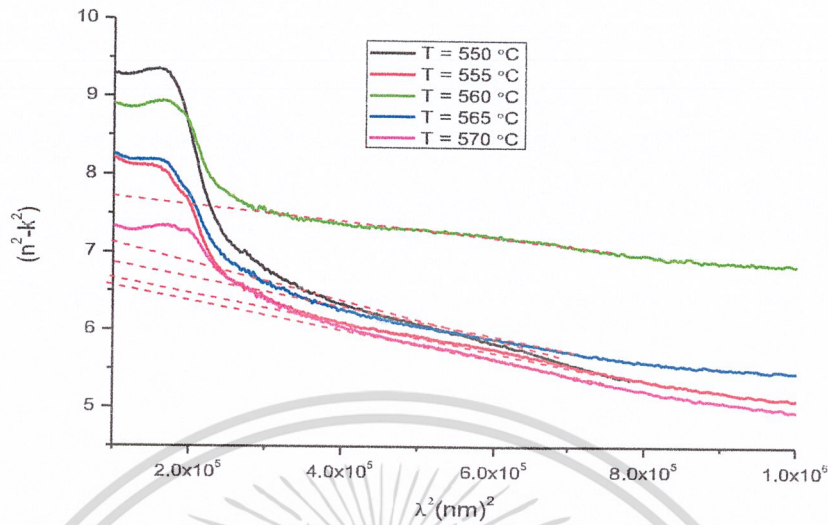
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูงมีผลจากการสั่นของทั้งพาหะอิสระและแลตทิซ ค่าดัชนีหักเหของแสง (n) และอัตราส่วนของพาหะอิสระต่อมวลยังผล (N/m^*) หาได้จากความสัมพันธ์

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(n^2 - k^2)$ กับ $(\lambda)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

ความถี่พลาสมา (ω_p) สามารถคำนวณได้จาก

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

สมการสปีตเซอร์) แพนอาจเขียนอยู่ในรูปของสภาพซึมซาบได้ทางไฟฟ้า-Electric susceptibility, χ_e) ดังสมการ

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

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

และ
$$P = \epsilon_0 \chi_e \zeta$$

โดยที่ P และ ζ คือ โพรราไรเซชันและสนามไฟฟ้าตามลำดับ

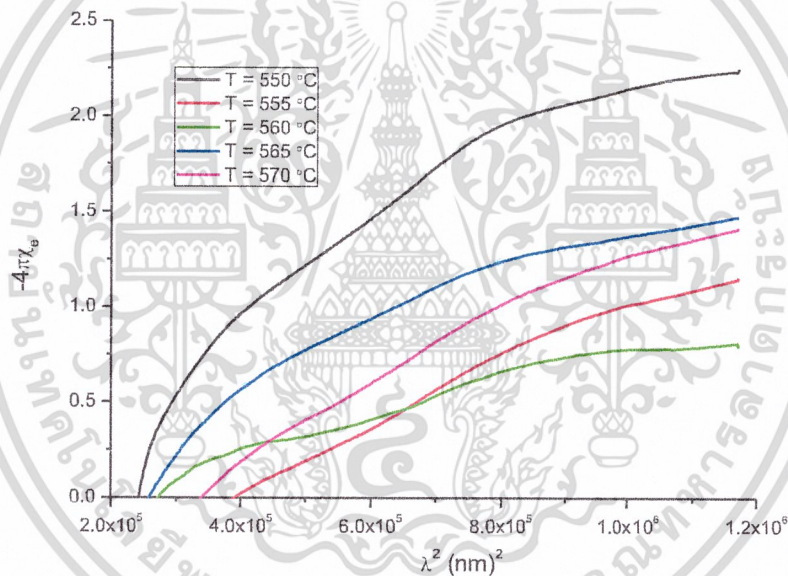
จากความสัมพันธ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(-4\pi\chi_e)$ กับ $(\lambda)^2$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

จะเห็นได้ว่า χ_e ของพาหะอิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเพียงพอที่จะไปลดค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยเฉพาะในย่านอินฟราเรด

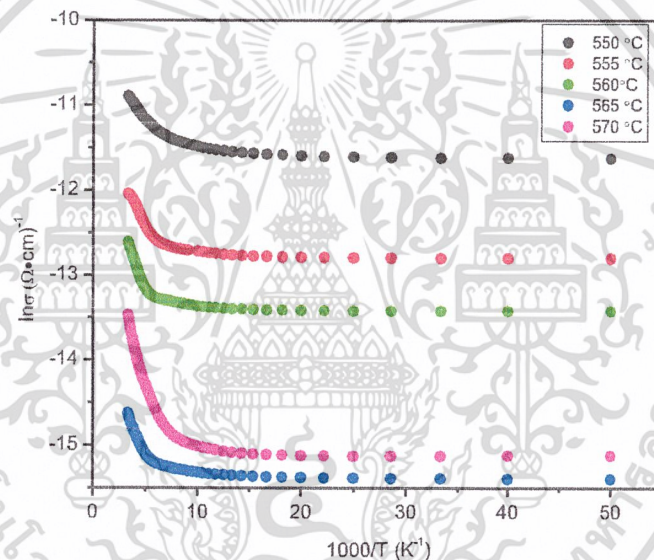
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 โดยอาศัยแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวแบบจำลองเซลไมเออร์และแบบจำลองสปิตเซอร์-แพน

| Source Temperature (°C) | E_0 (eV) | E_d (eV) | M_{-1} | M_3 (eV) ⁻² | f (eV) ² | n_0 | N_c | E_l (eV) | ϵ_∞ | λ_0 (nm) | S_0 (10 ¹⁴ S ⁻²) | ϵ_L | $\frac{N}{m^*}$ (cm ⁻³ .g ⁻¹) | W_p (10 ¹⁴ S ⁻¹) |
|-------------------------|------------|------------|----------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|------------|-------------------|------------------|---|--------------|--|---|
| 550 | 2.481 | 9.746 | 3.926 | 0.637 | 24.189 | 2.219 | 1.615 | 0.274 | 9.616 | 102.60 | 8.18 | 2.72 | 2.10 × 10 ⁵⁴ | 5.59 |
| 555 | 2.800 | 11.419 | 4.077 | 0.519 | 31.979 | 2.253 | 1.893 | 0.242 | 8.724 | 136.29 | 5.86 | 2.60 | 1.50 × 10 ⁵⁴ | 4.41 |
| 560 | 2.624 | 10.989 | 4.892 | 0.530 | 28.835 | 2.362 | 1.126 | 0.228 | 9.665 | 138.48 | 4.51 | 2.79 | 1.15 × 10 ⁵⁴ | 3.96 |
| 565 | 2.692 | 11.110 | 4.124 | 0.569 | 29.913 | 2.264 | 1.841 | 0.147 | 9.665 | 198.73 | 2.63 | 2.91 | 2.28 × 10 ⁵⁴ | 3.96 |
| 570 | 2.626 | 10.221 | 3.891 | 0.564 | 26.845 | 2.211 | 1.694 | 0.233 | 7.877 | 177.50 | 2.59 | 1.87 | 2.90 × 10 ⁵⁴ | 9.42 |

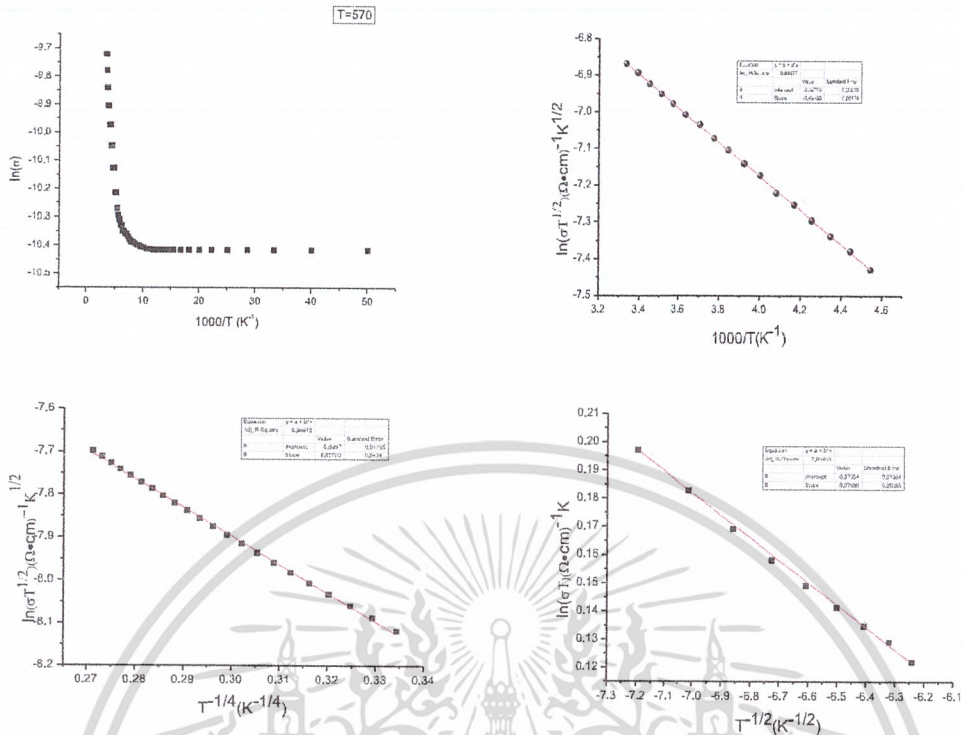
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.5.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\ln \sigma)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 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 Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที ที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโดที่อุณหภูมิปานกลาง เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

(E_a) การหาค่าพลังงานกระตุ้น-

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

แทนค่า

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

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(-0.462)}{1.6 \times 10^{-19}} = -0.040 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของ Sb_2S_3 มีค่าเท่ากับ 13.6

แทนค่า

$$\epsilon_s = (13.6)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 1.204 \times 10^{-12} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

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

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

$$\text{แทนค่า } N_a = \frac{8(1.204 \times 10^{-12})(0.040)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (100 \times 10^{-7})^2} = 2.41 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

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

$$\text{แทนค่า } L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(250)(1.204 \times 10^{-12})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.18 \times 10^{16})} \right]^{\frac{1}{2}} = 2.60 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_i)

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

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

$$\text{แทนค่า } E_i = \frac{1}{2}(1.75) - 0.040 = 0.835 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_i)

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

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

สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ (v_c) ได้จาก

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

$$\text{แทนค่า } v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(250)}{2\pi(0.663 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.35 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (N_v) ได้จาก

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

มวลยังผลของ Sb_2S_3 มีค่าเท่ากับ $0.663m_0$

แทนค่า $N_v = 2 \left[\frac{2\pi (0.663 \times 9.1 \times 10^{-31}) \times 1.38 \times 10^{-23} \times 250}{(6.625 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2}$

$N_v = 1.03 \times 10^{25}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้น

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

$$N_i = \left[\frac{(100 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (1.03 \times 10^{25}) (2.41 \times 10^{16}) (1.35 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (250) (5.275 \times 10^{-5})} \right] \times$$

$$\exp\left(-\frac{0.040 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 250}\right) + (100 \times 10^{-7} \times 2.41 \times 10^{16})$$

$= 2.41 \times 10^{11}$ ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณจากแบบจำลองของซีโตของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | \mathcal{E}_s (F/cm^2) ($\times 10^{-12}$) | E_b (eV) | N_d (cm^{-3}) ($\times 10^{16}$) | E_t (eV) | N_t (cm^{-2}) ($\times 10^{11}$) | L_D (nm) |
|----------------------------|--|---------------|--|---------------|--|---------------|
| 550 | 1.20 | 0.040 | 2.41 | 0.0710 | 2.41 | 26.0 |
| 555 | 1.20 | 0.035 | 2.11 | 0.715 | 2.11 | 30.4 |
| 560 | 1.20 | 0.041 | 2.47 | 0.709 | 2.47 | 28.1 |
| 565 | 1.20 | 0.038 | 2.29 | 0.712 | 2.29 | 29.2 |
| 570 | 1.20 | 0.054 | 3.25 | 0.696 | 3.25 | 24.5 |

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ ค่าแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซีโพเนนเชียล (σ_0)

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

$$y = mx + c$$

$$y = -6.6576X - 5.8997$$

$$\ln \sigma_0 = -5.8997$$

$$\sigma_0 = e^{-5.8997}$$

$$= 2.74 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$$

จาก $m = -T_0^{\left(\frac{1}{4}\right)}$, $c = \ln \sigma_0$

$$T_{0,Mott} = (-6.6576)^4 = 1.97 \times 10^3 \text{ K}$$

$$\text{โดย } T_0 = \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q} N_0(E_F)}$$

$$\alpha = 1.24 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$$

$$N_0(E_F) = \frac{18(1.24 \times 10^7)^3}{\left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (1.97 \times 10^3)}$$

$$\text{เนื่องจาก } \epsilon_s = 1.2036 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$$

$$N_0(E_F) = 2.02 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

หาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R)

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9}{8\pi\alpha \frac{k}{q} T N_0(E_F)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \left[\frac{9}{8\pi (1.24 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (185) (2.02 \times 10^{23})} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= 5.47 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

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

$$= \frac{3}{4\pi (5.47 \times 10^{-8})^3 (2.02 \times 10^{23})} = 7.22 \times 10^{-3} \text{ eV}$$

$$\alpha R_{hop,Mott} = (1.24 \times 10^7) (5.47 \times 10^{-8})$$

$$= 0.68$$

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1.24 \times 10^7} = 8.06 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

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

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (2.3022 \times 10^{19})^{\frac{2}{3}} (8.06 \times 10^{-8})}{(1.38 \times 10^{-23}) (4\pi) (13.6 \times 8.85 \times 10^{-14})}$$

$$= 80.19 \text{ K}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{5.47 \times 10^{-8}}{8.06 \times 10^{-8}}$$

$$= 0.68$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 25 นาที

| Source Temperature (°C) | $\sigma_{0,Mott}$ (S/cm) | $T_{0,Mott}$ (K) | $N_0(E_F)$ (cm ⁻³) | T_{C1} (K) | $W_{hop,Mott}$ (meV) | $R_{hop,Mott}$ (nm) | $\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$ |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 550 | 2.74×10^{-3} | 1.97×10^3 | 2.20×10^{23} | 80.19 | 7.22 | 0.547 | 0.68 |
| 555 | 6.70×10^{-4} | 9.36×10^3 | 4.25×10^{22} | 0.76 | 10.6 | 0.808 | 1.0 |
| 560 | 2.86×10^{-4} | 7.07×10^3 | 5.63×10^{22} | 0.78 | 8.50 | 0.753 | 0.93 |
| 565 | 4.71×10^{-5} | 8.86×10^3 | 4.58×10^{22} | 0.78 | 10.45 | 0.793 | 0.98 |
| 570 | 1.38×10^{-3} | 1.39×10^5 | 2.86×10^{21} | 1.01 | 20.00 | 1.59 | 1.97 |

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพ
รอส ซลอปสกี-(ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$y = mx + c \Rightarrow y = -13.472x - 4.5803$$

$$\text{จาก } C = \ln_{\sigma, ES}$$

$$\sigma_{0, ES} = e^c = e^{-4.5803} = 1.03 \times 10^2 \text{ s / cm}$$

$$\text{จาก } m = -T_0^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{ที่ } x = 0.0$$

$$T_{0, ES} = (-13.472)^2 = 1.82 \times 10^2 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \xi_{ES} &= \frac{2.8e^2}{k_0 T_{0, ES} \epsilon_s} \\ &= \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(1.81494 \times 10^2)(9.425 \times 10^{-13})} \\ &= 3.04 \times 10^{-5} \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{R_{hop, ES}}{\xi_{ES}} &= \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0, ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{1.81494 \times 10^2}{75} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.3884 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{hop, ES} &= \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0, ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{(1.38 \times 10^{-23})}{(1.6 \times 10^{-19})} (75) \left(\frac{1.81494 \times 10^2}{75} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= 5.024 \times 10^{-3} \text{ eV} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{C2} = \frac{16T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} = \frac{16(1.81494 \times 10^2)^2}{1.97 \times 10^3}$$

$$= 266.07K$$

$$\Delta C = \frac{K_B}{q} \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{1.81494 \times 10^2}{1.97 \times 10^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

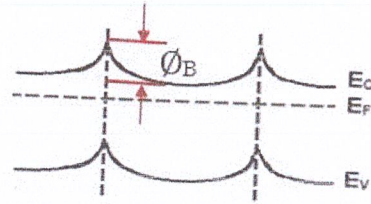
$$= 2.61 \times 10^{-5} eV$$



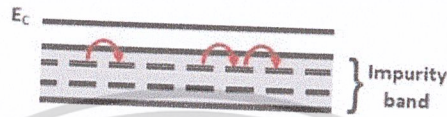
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเฮฟโรสซอลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาการระเหิด 25 นาที ที่ 570 องศาเซลเซียส

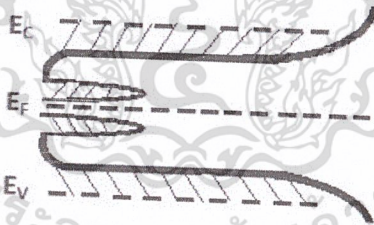
| Source Temperature ($^{\circ}C$) | $\sigma_{0,ES}$ (S/cm) | $T_{0,ES}$ (K) | ξ_{ES} (nm) | T_{C2} (K) | $W_{hop,ES}$ (meV) | ΔC (eV) | $\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$ |
|------------------------------------|------------------------|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 550 | 1.03×10^{-2} | 1.82×10^2 | 304.0 | 266.07 | 5.024 | 2.61×10^{-5} | 0.388 |
| 555 | 1.06×10^{-3} | 2.02×10^2 | 273.0 | 69.75 | 5.308 | 1.27×10^{-5} | 0.410 |
| 560 | 5.42×10^{-4} | 1.92×10^2 | 287.0 | 83.43 | 5.180 | 1.42×10^{-5} | 0.400 |
| 565 | 7.56×10^{-5} | 1.91×10^2 | 289.0 | 67.25 | 5.160 | 1.28×10^{-5} | 0.399 |
| 570 | 9.58×10^{-5} | 1.87×10^2 | 295.0 | 4.03 | 5.107 | 3.16×10^{-6} | 0.395 |



(ก)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.33 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

(ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโด

(ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน

(ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

(ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชโลฟสกี

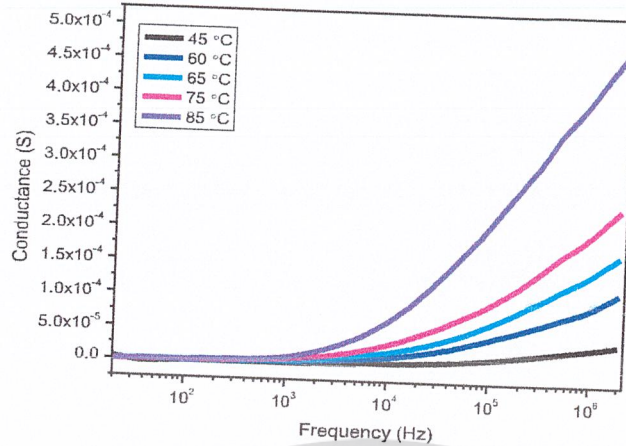
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยใช้ความถี่ในช่วง 2 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

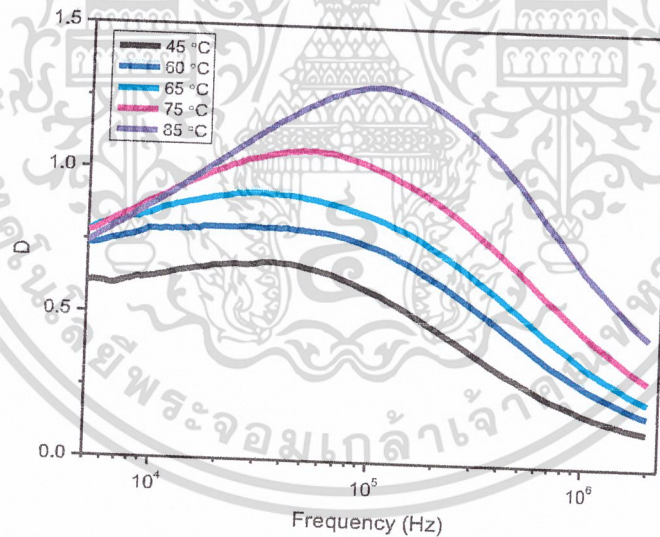


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

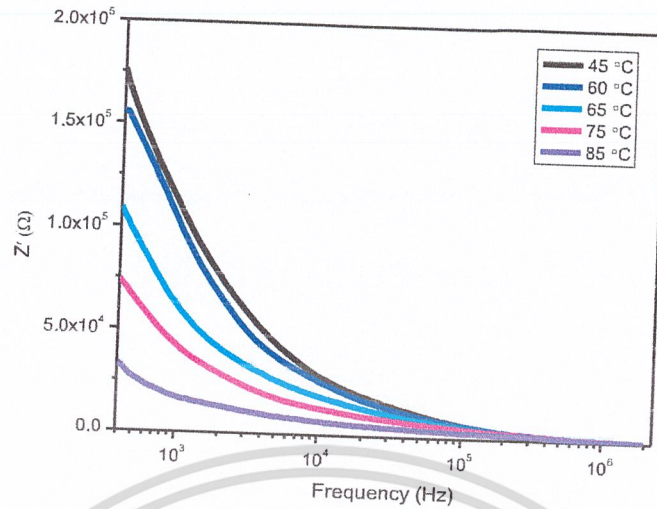


รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

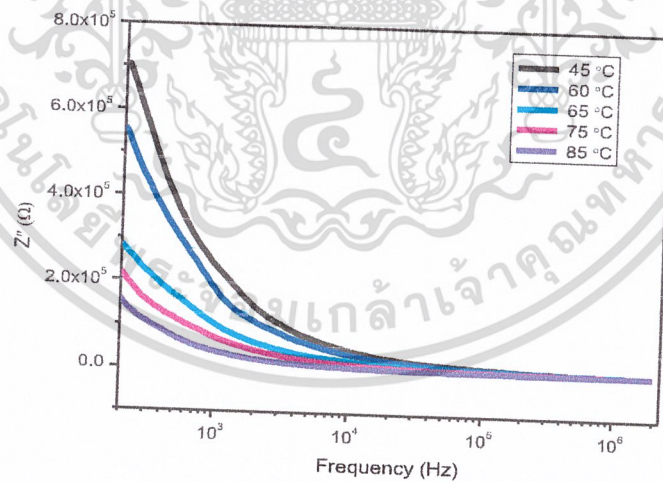


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียความเป็นฉนวนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

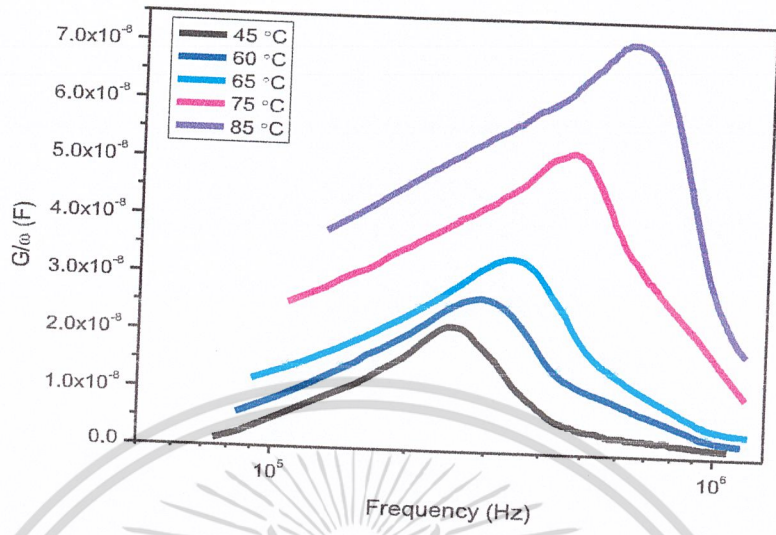


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

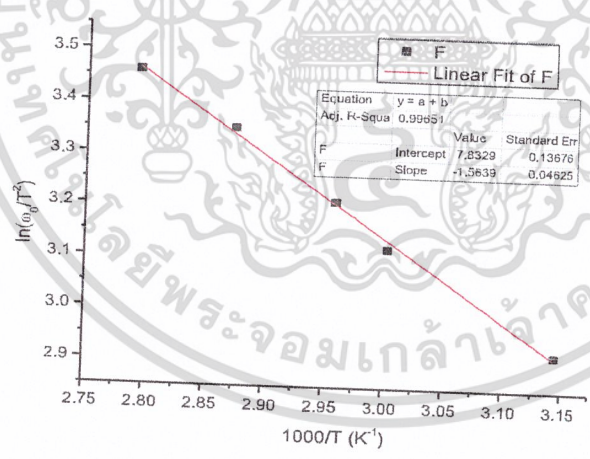


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{G}{\omega}$ กับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่า $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right)$ กับ $\left(\frac{1000}{T}\right)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{G}{\omega}$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 45 ถึง 85 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนำกระแสลับ(G) สัมพันธ์กัน กับดักพาหะชนิดเดียว (single trap) ดังสมการ

$$\left(\frac{G}{\omega}\right) = \frac{C_{it}\omega\tau_{it}}{1 + \omega^2\tau_{it}^2}$$

โดยที่ C_{it} และ τ_{it} คือความจุไฟฟ้าของกับดักพาหะและเวลาผ่อนคลายของอิเล็กตรอนในกับดักพาหะ (relaxation time) และ G_p คือความนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดที่ความถี่ ω_0 เมื่อทราบค่า ω_0 แล้ว

จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ

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

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในสมการเส้นตรงจะได้ว่า

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

และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจัดสมการใหม่จะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดแกน y นั้นได้ค่า $\ln \xi_0$ แล้วจะสามารถหา ξ_0 ได้ และสามารถหาค่า σ_T ได้จากสมการความสัมพันธ์

$$\xi_0 = 2\sigma_T v_{th} N_c$$

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c}$$

เมื่อ ξ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกับดักประจุ

ค่าพลังงานกระตุ้น E_a สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ กับ ซึ่ง สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมากแต่ค่าของ และ นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากโดยค่า ที่ได้จากวิธีการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า ความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากหลายวิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด

| Temperature | | 1000/T (K ⁻¹) | f ₀ (Hz) | ω ₀ (rad/s) | $\frac{\omega_0}{T^2}$ | ln($\frac{\omega_0}{T^2}$) | E _a (eV) | ξ ₀ (s ⁻¹ K ⁻²) | σ _i (cm ⁻²) |
|-------------|-----|------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|--|---------------------------------------|
| °C | K | | | | | | | | |
| 45 | 318 | 3.14 | 3.0×10 ⁵ | 1.88×10 ⁵ | 18.59 | 2.92 | 2.52×10 ³ | 1.26×10 ⁻²² | |
| 60 | 333 | 3.00 | 4.0×10 ⁵ | 2.51×10 ⁶ | 22.64 | 3.12 | | | |
| 65 | 338 | 2.96 | 4.5×10 ⁵ | 2.83×10 ⁶ | 24.77 | 3.21 | | | |
| 75 | 348 | 2.87 | 5.5×10 ⁵ | 3.46×10 ⁶ | 28.54 | 3.35 | | | |
| 85 | 358 | 2.79 | 6.5×10 ⁵ | 4.08×10 ⁶ | 31.83 | 3.46 | | | |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศที่ความดัน 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่ให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 550, 555, 560, 565 และ 570 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะใช้เวลาในการระเหิด 25 นาทีจากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลพร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไป

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อนจนถึงเทาเข้ม ลักษณะมันวาว และมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 28 องศา ตรงกับระนาบผลึก (211) ของระบบออร์โธโรมบิก สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลพีคของระนาบ (211) เลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เล็กลง และความเข้มของพีคมีแนวโน้มลดลงด้วย

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบาง ซึ่งลักษณะของเกรนที่พบมีขนาดใหญ่อยู่ในระดับ 5 ไมโครเมตร

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ สามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จากอุณหภูมิของสารตั้งต้น 550 – 570 องศาเซลเซียส พบว่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) โดยมีค่าเท่ากับ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสภาพไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในช่วงอุณหภูมิ 280-220 เคลวิน การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้รับที่อยู่ติดกันดังความสัมพันธ์

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

พลังงานความร้อนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับพลังงานผู้รับ เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนในระดับพลังงานผู้รับเหล่านี้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 185-80 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (ระดับพลังงานท้องถิ่นนี้จะอยู่ที่ระดับเฟอร์มิ) ดังความสัมพันธ์

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

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด สำหรับกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่จะเกิดการกระโดดไปมาในบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่กับดักพาหะที่อยู่ในเนื้อเกรน กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 65-25 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพโรส-ชโลฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

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

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และ ช่องว่างของคูลอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศพบว่า ความจุไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้คือ (Herberholz, 1998)

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

เมื่อ C_∞ คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูง (high frequency) C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (low frequency) ส่วน τ คือ เวลาผ่อนคลาย (relaxation time) สำหรับ α มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติในวัสดุทั่วไปมักมีกับดักประจุ (trap) เมื่อพิจารณาในกรณีที่มีกับดักระดับพลังงานเดียว (single trap level) ความจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับกับดักจะแปรตรงกับความถี่ดังนี้ คือ

$$C_T \propto \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 + \omega^2)}$$

เมื่อ ω_0 คือ ความถี่เชิงมุมที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า (C) กับ ความถี่ (f) ซึ่งความถี่ ω_0 นี้จะสัมพันธ์กับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (emission rate) ออกจากกับดักประจุ

ค่าความนำไฟฟ้า (G) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 จะปรากฏที่ความถี่ต่ำกว่า 10^5 เฮิรตซ์ โดยประมาณ เป็นผลของการนำไฟฟ้ากระแสตรงของพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการจอนเซอร์ ดังนี้คือ

$$G_{ac} = G_{dc} + A\omega^s$$

แต่เมื่อความถี่สูงกว่า 10^5 เฮิรตซ์ อิเล็กตรอนในกับดักจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกมาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามความถี่

สำหรับค่าจำนวนจริง (z') และจำนวนเชิงซ้อน (z'') ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 โดยทั่วไปสามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลที่ตัวเก็บประจุ (CPE) ต่อขนานกับตัวต้านทาน (R_p) จำนวน 2 ชุดต่ออนุกรมกัน จะได้ว่า

$$Z' = \frac{R_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{R_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2}$$

$$Z' = \frac{-R_b \omega_b C_b}{1 + (\omega_b C_b R_b)^2} + \frac{-R_{gb} \omega_{gb} C_{gb}}{1 + (\omega_{gb} C_{gb} R_{gb})^2}$$

จะเห็นได้ว่า อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีสามารถแยกผลของความต้านทานของเนื้อวัสดุในเกรน (R_b) และความต้านทานของบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน (R_{gb}) (grain boundary) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ออกจากกันได้ จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่า Z' จะลดลง สำหรับค่า Z'' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด จะเรียกความถี่เชิงมุมนี้ว่า ความถี่ผ่อนคลาย (ω_{max}) จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นสำหรับการทดลอง เวลาผ่อนคลาย τ สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\tau = \frac{1}{\omega_b} = C_b R_b$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_{gb}} = C_{gb} R_{gb}$$

จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะได้ว่าจุดแกนนอน (แกน Z') จะระบุค่า (R_b) และ (R_{gb}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงพฤติกรรมปกติของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

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

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

จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2559. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปคเตอร์ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์ม บาง CuO โดยวิธีแอ็คทีฟดีซีสเปคเตอร์เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

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

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

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

จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์,

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาเบไซบระเยชนคานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ อนุรักษ์ พรหมรส, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

Amlouk M. Haj Lakhdar, M. and Ouni, B. 2014. "Dielectric Relaxation, Modulus Behavior and Conduction Mechanism in Sb_2S_3 Thin Films". *Thin Solid Films*. 19: 32-39

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.

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

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

Bhattacharjee, R. Banerjee, P. Ghosh, B. 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.

Bletskan, D.I. 2005. Phase equilibrium in binary systems $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$. *J. Ovonic Res.* 1(5):61-

- Bube R.H. and Fahrenbruch A.L. 1983. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion**. New York : Academic Press Inc. : 44.
- Burton, L.A. and Walsh, A. 2012. "Phase Stability at the Earth-Abundant Tin Sulfides SnS, SnS₂, and Sn₂S₃". *J. Phys. Chem. C*. 116:24262-24267.
- Chen, G. Feng, L. Guo, L. Wang, X. and Zheng, X. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers". *Appl. Phys. Lett.* 102: 072103-1-072103-3.
- Chen Q. Ren, S.T. and Zhao, F. 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.
- Cheng, S. and Conibeer, G. 2011. "Physical Properties of Very Thin SnS Films Deposited by Thermal Evaporation". *Thin Solid Films*. 520: 837-841.
- Chen, Z. Shi, C. Yang, P. and Yao, M. 2013. "Preparation SnS₂ Thin Films by Close Spaced Sublimation at Different Source Temperatures". *Thin Solid Films*. 534: 28-31.
- Ciupina, V. Prodan, G. Rusu, G.I. Tigau, N. and Vasile, E. 2005. "Structural and Electrical Properties of Antimony Trisulfide Thin Films". *J. Optoelectronics and Advanced Materials*. 7: 727-732
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-ray Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company Inc. : pp 9-14.
- Devika, M. Gunasekhar, K.R. Patolsky, F. and Reddy, N.K. 2008. "Ohmic Contacts to SnS Films: Selection and Estimation of Thermal Stability". *J. Appl. Phys.* 104: 124503-1-124503-6.
- Dhankhar, M. Singh, O.P. and Singh, V.N. 2014. "Physical Principles of Losses in Thin Film Solar Cells and Efficiency Enhancement Methods". *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.
- Djessas, K. Guastivino, F. Llinares, C. Masse, G. and Yanuar, H. 2000. "SnS Thin Films Grown by Close Spaced Vapor Transport". *J. Mater. Sci. Lett.* 19: 2135-2137.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Doty, J.E. Firester, A.H. Kane, M.G. and Gu, G. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors". *Appl. Phys. Lett.* 87: 243512-1- 243512-3.
- Dunlop, E.D. Emery, K. Green, M.A. Hishikawa, Y. and Warta, W. 2015. "Solar Cell Efficiency Tables (Version 45)". *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 23(1): 1-9.
- 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.
- Emery, K. Green, M.A. Hishikawa, Y. and et al. 2015. "Solar Cell Efficiency Table" . *Res. Appl.* 23:1-9
- 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.
- Gedi, S. Miles, R.W. Park, C. Ramakrishna Reddy, K.T. and Reddy, V.R.M. 2015. "Development of Sulphurized SnS Thin Films Solar Cells". *Curr. Appl. Phys.* 15: 588-598.
- 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.
- Gordon, R.G. Kim, S.B. Lee, S.W. Park, H.H. Sinsersuksakul, P.L. Sun, P.L. and Yang, C. 2014. "Overcoming Efficiency Limitations of SnS-Based Solar Cells". *Adv. Energy Mater.* 4: 14004961-1400491-7
- Guillaume Zoppi, Forbes, I. Miles, R.W. Ogah, E.O. 2009. "Thermally Evaporated Thin Films of SnS for Application in Solar Cell Devices". *Thin Solid Films.* 517:4702-4705.
- Hariskos, D. Jackson, P. Lotter, E. Manner, R. Paetel, S. Powalla, M. Wischmann, W. and Wuerz, R. 2011. "New World Record Efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films Solar Cells Beyond 20 %". *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 19: 894-897.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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.
- Hung, H.C. Lin, Y.J. and Luo, J. 2013. "Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes". *Appl. Phys. Lett.* 102: 193511- 1193511-3.
- 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.
- Jiang, H.X. Johnson, C. and Lin, J.Y. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN". *Appl. Phys. Lett.* 68(13): 1808-1810.
- Khrypunov, G.S. Kirichenko, M.V. Klochko, N.P. Kopach, V.R. Lyubov, V.M. Momotenko, O.V. Tyukhov, I.I. and Volkova, N.D. 2015. "Structure and Properties of SnS ThinLayers Obtained by Sulfurization of Electro-Deposited Tin Precursors". *Solar Energy.* 118: 117-125.
- Kittel C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. United States of America : John Wiley & Sons Inc.
- Layers Obtained by Sulfurization of Electro-Deposited Tin Precursors". *Solar Energy.* 118: 117-125.
- Lin, J.H. Lin, Y.J. Su, Y.C. and Zeng, J.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.
- Moller, H.J. "Semiconductors for Solar Cells", Artech House, Inc. 1993.
- Muhhopadhyay, I. Patel, M. and Ray, A. 2013. "Annealing Influence Over Structural and Optical Properties of Sprayed SnS Thin Films". *Optical Materials.* 35: 1693-1699.
- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument.* 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill.
- 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 Pauw L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Repts.* 13 : 1-9.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xu, J. and Yang, Y. 2014. "Study of the Performances of SnS Heterojunction by Numerical Analysis". *Energy Conversion and Management*. 78: 260-265.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Sb₂S₃
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.42-1393

| Pattern : 42-1393 | | Radiation = 1.540600 | | | | | Quality : High | | | | |
|---|--|--------------------------------|-----|---|---|---|----------------|---|---|---|---|
| Sb ₂ S ₃ | | 2th | l | h | k | l | 2th | l | h | k | l |
| Slibnite / Antimony Sulfide antimonite antimony black antimony glance | | 11.122 | 14 | 1 | 1 | 0 | 63.252 | 1 | 7 | 1 | 1 |
| | | 15.644 | 57 | 0 | 2 | 0 | 63.590 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| | | 15.742 | 21 | 2 | 0 | 0 | *63.590 | 2 | 4 | 3 | 2 |
| | | 17.523 | 74 | 1 | 2 | 0 | 64.278 | 4 | 5 | 1 | 2 |
| | | 22.280 | 27 | 2 | 2 | 0 | 64.328 | 5 | 6 | 4 | 1 |
| | | 24.496 | 28 | 1 | 0 | 1 | 64.428 | 6 | 5 | 6 | 0 |
| | | 24.886 | 100 | 1 | 3 | 0 | 64.528 | 4 | 6 | 5 | 0 |
| | | 25.014 | 79 | 3 | 1 | 0 | 64.678 | 4 | 2 | 7 | 1 |
| | | 25.727 | 23 | 1 | 1 | 1 | 65.033 | 4 | 7 | 2 | 1 |
| | | 28.073 | 14 | 0 | 2 | 1 | 65.860 | 4 | 2 | 5 | 2 |
| | | 28.485 | 39 | 2 | 3 | 0 | 66.017 | 4 | 5 | 2 | 2 |
| | | 28.578 | 30 | 3 | 2 | 0 | 66.495 | 3 | 8 | 0 | 0 |
| | | 29.160 | 45 | 1 | 2 | 1 | 66.602 | 4 | 1 | 8 | 0 |
| | | 29.248 | 82 | 2 | 1 | 1 | 66.710 | 3 | 4 | 7 | 0 |
| | | 32.352 | 66 | 2 | 2 | 1 | 67.089 | 2 | 8 | 1 | 0 |
| | | 32.607 | 19 | 1 | 4 | 0 | 67.583 | 2 | 3 | 7 | 1 |
| | | 32.849 | 8 | 4 | 1 | 0 | 67.694 | 1 | 4 | 4 | 2 |
| | | 33.395 | 34 | 3 | 0 | 1 | 68.768 | 3 | 3 | 5 | 2 |
| | | 33.666 | 9 | 3 | 3 | 0 | *68.768 | 3 | 8 | 2 | 0 |
| | | 34.236 | 11 | 1 | 3 | 1 | 68.883 | 4 | 5 | 3 | 2 |
| | | 34.345 | 15 | 3 | 1 | 1 | 69.465 | 3 | 5 | 6 | 1 |
| | | 35.525 | 43 | 2 | 4 | 0 | 69.820 | 3 | 0 | 6 | 2 |
| | | 35.641 | 19 | 4 | 2 | 0 | 70.118 | 2 | 6 | 0 | 2 |
| | | 36.994 | 12 | 2 | 3 | 1 | 70.663 | 2 | 6 | 1 | 2 |
| | | 39.546 | 17 | 0 | 4 | 1 | 70.846 | 2 | 6 | 6 | 0 |
| | | 39.911 | 13 | 3 | 4 | 0 | 71.216 | 2 | 3 | 8 | 0 |
| | | 40.004 | 12 | 4 | 3 | 0 | 71.959 | 6 | 8 | 1 | 1 |
| | | 40.378 | 21 | 1 | 4 | 1 | 72.096 | 5 | 2 | 6 | 2 |
| | | 40.568 | 14 | 4 | 1 | 1 | 72.352 | 3 | 6 | 2 | 2 |
| | | 40.894 | 4 | 5 | 1 | 0 | 72.670 | 2 | 5 | 4 | 2 |
| | | 41.286 | 3 | 3 | 3 | 1 | 73.198 | 3 | 2 | 8 | 1 |
| | | 42.803 | 11 | 2 | 4 | 1 | 74.955 | 1 | 3 | 6 | 2 |
| | | 42.952 | 22 | 4 | 2 | 1 | 75.094 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| | | 43.038 | 19 | 2 | 5 | 0 | 75.515 | 2 | 8 | 4 | 0 |
| | | 43.298 | 9 | 5 | 2 | 0 | 76.445 | 2 | 8 | 3 | 1 |
| | | 45.450 | 6 | 4 | 4 | 0 | 76.693 | 2 | 5 | 7 | 1 |
| | | 46.611 | 7 | 3 | 4 | 1 | 76.735 | 3 | 9 | 1 | 0 |
| | | 46.764 | 44 | 5 | 0 | 1 | *76.736 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| | | 47.046 | 27 | 5 | 3 | 0 | 77.775 | 2 | 2 | 9 | 0 |
| | | 47.306 | 27 | 1 | 5 | 1 | 77.925 | 2 | 7 | 1 | 2 |
| | | *47.306 | 27 | 0 | 0 | 2 | 78.363 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | | 47.543 | 18 | 5 | 1 | 1 | 78.788 | 2 | 4 | 6 | 2 |
| | | 48.213 | 6 | 0 | 6 | 0 | 78.923 | 3 | 6 | 4 | 3 |
| | | 48.569 | 4 | 6 | 0 | 0 | *78.923 | 3 | 3 | 0 | 2 |
| | | 48.735 | 3 | 1 | 1 | 2 | 79.236 | 3 | 2 | 7 | 2 |
| | | 48.930 | 3 | 1 | 6 | 0 | 79.551 | 4 | 7 | 2 | 2 |
| | | 49.298 | 5 | 6 | 1 | 0 | 79.870 | 3 | 4 | 8 | 1 |
| | | 49.440 | 4 | 2 | 5 | 1 | | | | | |
| | | 50.138 | 2 | 0 | 2 | 2 | | | | | |
| | | 50.856 | 3 | 2 | 1 | 2 | | | | | |
| | | 51.069 | 2 | 2 | 6 | 0 | | | | | |
| | | 51.378 | 2 | 6 | 2 | 0 | | | | | |
| | | 51.911 | 3 | 5 | 4 | 0 | | | | | |
| | | 52.913 | 15 | 3 | 5 | 1 | | | | | |
| | | 53.045 | 13 | 5 | 3 | 1 | | | | | |
| | | 54.129 | 26 | 0 | 6 | 1 | | | | | |
| | | 54.198 | 27 | 1 | 3 | 2 | | | | | |
| | | *54.198 | 27 | 3 | 1 | 2 | | | | | |
| | | 54.407 | 12 | 3 | 6 | 0 | | | | | |
| | | 54.653 | 5 | 6 | 3 | 0 | | | | | |
| | | 54.759 | 3 | 1 | 6 | 1 | | | | | |
| | | 55.116 | 2 | 6 | 1 | 1 | | | | | |
| | | 56.141 | 3 | 2 | 3 | 2 | | | | | |
| | | 56.216 | 4 | 3 | 2 | 2 | | | | | |
| | | 57.559 | 2 | 5 | 4 | 1 | | | | | |
| | | *57.559 | 2 | 1 | 7 | 0 | | | | | |
| | | 58.930 | 2 | 4 | 6 | 0 | | | | | |
| | | 59.096 | 2 | 6 | 4 | 0 | | | | | |
| | | 59.304 | 2 | 3 | 3 | 2 | | | | | |
| | | 59.472 | 3 | 2 | 7 | 0 | | | | | |
| | | 59.812 | 7 | 7 | 2 | 0 | | | | | |
| | | 59.897 | 5 | 3 | 6 | 1 | | | | | |
| | | 60.155 | 4 | 6 | 3 | 1 | | | | | |
| | | 60.546 | 8 | 2 | 4 | 2 | | | | | |
| | | 60.634 | 7 | 4 | 2 | 2 | | | | | |
| | | 62.540 | 3 | 3 | 7 | 0 | | | | | |
| | | 62.681 | 3 | 7 | 0 | 1 | | | | | |
| | | 62.870 | 3 | 7 | 3 | 0 | | | | | |
| Radiation : CuKα | | Filter : Monochromator crystal | | | | | | | | | |
| Lambda : 1.54184 | | d-sp : Diffractometer | | | | | | | | | |
| SS/FOM : F30= 62(0.0137,35) | | Internal standard : Si | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้