

การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วย
ลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง



นางสาว ลลิตา เจริญอุตม์วงษา
นาย วิฑูรย์ ยินดีสุข

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 43953
วัน, เดือน, ปี... 18 ต.ค. 2545

.b.....
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

A preparation of Se thin films by high vacuum
electron beam evaporator



Miss Lalita

Charoenwuttiwongsa

Mr. Witoon

Yindeesuk

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมฟิล์มบางซีดีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วย

ลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

โดย

นางสาวลลิตา เจริญวุฒิวงษา

นายวิฑูรย์ ยินดีสุข

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

ผศ. วิชาญ เตชิตธีระ

อ. วิษณุ เพชรภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



.....
(รองศาสตราจารย์ สุวรรณ คูสำราญ)

ประธานกรรมการ



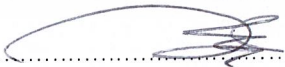
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว)

กรรมการ



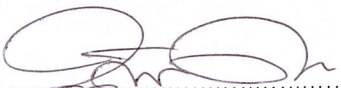
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

กรรมการ



.....
(อาจารย์ วิษณุ เพชรภา)

กรรมการ



.....
(อาจารย์ บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วย ลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง
นักศึกษาผู้รับผิดชอบโครงการ	นางสาวลลิตา เจริญวุฒิมิงษา นายวิฑูรย์ ยินดีสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ อ. วิชาญ เพชรภา
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง ที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับอยู่ในช่วง 30 – 150 องศาเซลเซียส ผลการตรวจสอบสมบัติโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่าเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับตั้งแต่ 30 – 120 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางซีลีเนียมจะมีโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous:a-Se) และเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับประมาณ 150 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางซีลีเนียมจะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal:γ-Se) แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซีลีเนียมตรวจสอบได้โดยการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง พบว่า แถบพลังงานต้องห้ามของ a-Se มีค่าประมาณ 2 eV และ γ-Se มีค่าประมาณ 1.8 eV

Special Project Title	A Preparation of Se thin films by high vacuum electron beam evaporator	
Name	Miss Lalita Charoenwuttiwongsa	Mr. Witoon Yindeesuk
Special Project Advisor	Assist.Prof.Dr. Jiti Nukaew	Assist.Prof. Wichand Thaechitteera
	Mr. Wisanu	Petcharapa
Department	Applied Physics	
Academic Year	2544	

ABSTRACT

The high vacuum electron beam evaporator has prepared the selenium (Se) thin films at any substrate temperature. The substrate temperature is in a range of 30-150 °C. The result is investigated by X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM) at the substrate temperature about 30-120 °C shows that Se thin film has a structure as amorphous (a-Se) and the substrate temperature at 150 °C shows that thin film has a structure as hexagonal (γ -Se). The energy gap of Se thin film is investigated by transmittance spectroscopy. The energy gap of a-Se is about 2 eV and γ -Se is about 1.8 eV.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายๆ ท่าน
ด้วยกัน ผู้เขียนขอขอบคุณ

ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านวิชาการ และให้โอกาสในการทำโครง
งาน ตลอดทั้งให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์จนโครงการนี้สามารถสำเร็จ
ลุล่วงด้วยดี

รศ. สุวรรณ คุณสำราญ ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านวิชาการและให้คำแนะนำเรื่องแสงที่มี
ประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินโครงการ

ผศ. วิชาญ เตชิตธีระ ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้ด้านวิชาการและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์
อย่างยิ่งในการดำเนินโครงการ

อ. วิษณุ เพชรภา ผู้ซึ่งคอยให้คำแนะนำและข้อสังเกตที่มีประโยชน์ต่อโครงการ

อ. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ ผู้ซึ่งคอยให้คำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินโครงการ
และช่วยตรวจสอบแก้ไขในตัวรายงานให้มีความสมบูรณ์ถูกต้อง

นายวิน บรรจงปรุ ที่คอยให้กำลังใจ ตลอดจนให้คำแนะนำและคอยดูแลตลอดมา จน
โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สมาชิก QOS Labทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือทุกด้านตลอดมา

และที่สำคัญ ขอขอบพระคุณ ครอบครัว เจริญวุฒิวงษา และครอบครัว ยินดีสุข สำหรับทุก
สิ่งทุกอย่างที่ทำให้มีวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษ	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 การดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 สมบัติทางกายภาพของซีลีเนียม	3
2.1.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของซีลีเนียม	3
2.1.2 ทฤษฎีอะมอร์ฟัสซีลีเนียม	3
2.1.3 ทฤษฎีเฮกซะโกนอลซีลีเนียม	6
2.2 ทฤษฎีในการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง	8
2.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	8
2.2.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	11
2.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปี	
แบบแยกกระจายพลังงาน	15
2.2.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัม	
การทะลุผ่านของแสง	17
2.2.5 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม	21
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยระบบระเหยสารด้วย	
ลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง	26
3.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน	28
4.1.1) ลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้	28
4.1.2) ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	30
4.1.3) ผลการตรวจสอบภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด	31
4.1.4) ผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซีลีเนียมโดย เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	32
4.1.5) ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่าน ของแสง	33
4.1.6) ผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซีลีเนียม	34
4.2 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกันที่อุณหภูมิห้อง	35
4.2.1) ลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้	35
4.2.2) ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
4.2.3) ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่าน ของแสง	37
4.2.4) ผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซีลีเนียม	38
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก	45

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอม	4
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะของแถบพลังงานต้องห้าม	6
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม	7
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน และ บริเวณโชนของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม	7
รูปที่ 2.5 X-Ray diffractometer	9
รูปที่ 2.6 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์	9
รูปที่ 2.7 รูปแบบของการเลี้ยวเบน	10
รูปที่ 2.8 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	14
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	14
รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	16
รูปที่ 2.11 การแสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	17
รูปที่ 2.12 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง	17
รูปที่ 2.13 ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง	19
รูปที่ 2.14 แสดงไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์	20
รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha(\hbar\omega)^2$ และ $\hbar\omega$	23
รูปที่ 3.1 แสดงระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง	25
รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศ	25
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน	28
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน	30
รูปที่ 4.3 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน	31
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิ แผ่นรองรับ 150 ^o C ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	32
รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิ แผ่นรองรับต่างกัน	33

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน	34
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน	35
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน	36
รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน	37
รูปที่ 4.10 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน	39



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเฮกซะโกนอลซีดีเนียม

หน้า

45



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางขึ้นมามากมาย เช่น Chemical Vapour Deposition (CVD), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE), Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE), RF Sputtering, Vacuum Thermal Evaporation เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัย และงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการสร้างสารกึ่งตัวนำ อุตสาหกรรมการเคลือบเลนส์ และอุตสาหกรรมเลนส์กรองแสง เป็นต้น

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง (High vacuum Electron Beam Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยการยิงลำอิเล็กตรอนเพื่อระเหยสารให้ขึ้นไปเกาะติดบนแผ่นรองรับ (substrate)

การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางนั้นมีวิธีการหลายวิธี เช่น การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Spectroscopy: XRD) การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) การตรวจสอบสารประกอบทางเคมีโดยเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS) และการตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) โดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง (Transmittance Spectroscopy) ซึ่งวิธีต่างๆ เหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่ถูกรเตรียมขึ้น เพื่อการย้อนกลับไปสู่การเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดีขึ้น และประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง
- 1.2.3 เพื่อหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมในการประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดทางแสง

1.3 การดำเนินงาน

การดำเนินงานเริ่มต้นด้วยการศึกษาคุณสมบัติโดยทั่วไปของธาตุซีลีเนียม ศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง และศึกษาวิธีการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง จากนั้นทำการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง และนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ตรวจสอบสารประกอบทางเคมีโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน และตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้ามด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับขณะทำการเคลือบฟิล์มบางซีลีเนียม
- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของความหนาของฟิล์มบางซีลีเนียมที่ต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สมบัติทางกายภาพของซีลีเนียม

2.1.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของซีลีเนียม

สารซีลีเนียมในธรรมชาติแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

(1) อะมอร์ฟัส (amorphous)

(2) ผลึก (crystalline) ซึ่งแบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ประเภทได้แก่

- เฮกซะโกนอลซีลีเนียม (Hexagonal Selenium : γ -Se) มีลักษณะเป็นสีเทา มีค่าการนำไฟฟ้าสูง
- โมโนคลินิกซีลีเนียม
 - แบบ α (α Monoclinic Selenium : α -Se) มีลักษณะเป็นสีแดงเข้ม มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ
 - แบบ β (β Monoclinic Selenium : β -Se) มีลักษณะเป็นสีแดง

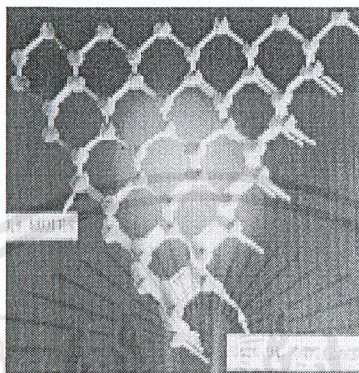
สมบัติเฉพาะของสารซีลีเนียมที่ใช้ คือ

เลขอะตอม	34
น้ำหนักอะตอม	78.96
จุดหลอมเหลว	217 °C
จุดเดือด	648.9 °C

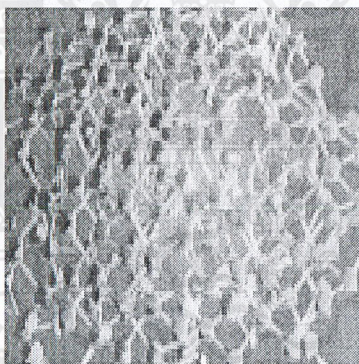
2.1.2 ทฤษฎีอะมอร์ฟัสซีลีเนียม

อะมอร์ฟัสซีลีเนียม (Amorphous Selenium: a-Se) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1948 พบว่า อะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ทำให้มีการนำอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมาประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ต่างๆมากมาย เช่น ตรวจจับแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ เป็นต้น

โครงสร้างของอะมอร์ฟัสซีลีเนียมจะประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้น แต่จะมีการเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบในระยะยาว และอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 2.2 eV การเรียงตัวของอะตอมของผลึกและอะมอร์ฟัส ดังรูปที่ 2.1



(ก) การเรียงตัวของอะตอมของผลึก



(ข) การเรียงตัวของอะตอมของอะมอร์ฟัส

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอม

เนื่องจากวัสดุอะมอร์ฟัสไม่มีเกรน (Grain) ไม่มีเส้นขอบเขตเกรน (grain boundary) และไม่มีรอยแตก (cleavage) ทำให้เกิดคุณสมบัติอื่น ๆ ขึ้นอีก เช่น ความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ดีและความสามารถในการเปล่งได้ดี

เมื่อแบ่งอะมอร์ฟัสตามสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์จะแบ่งได้เป็นสองตระกูล คือ ตระกูลเตตระเฮดรัล (tetrahedral semiconductor) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหมู่ 3-5 เช่น Si, Ge, Ga, As และ ตระกูลแคลโคไจไนด์ (chalcogenide semiconductor) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหมู่ 2 และ 6 เช่น S, Se, Te

อะมอร์ฟัสซีลีเนียมจัดอยู่ในตระกูลแคลโคไจไนด์ เนื่องจากอยู่ในธาตุหมู่ 6 ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 4 ตัว ในจำนวนนี้อิเล็กตรอน 2 ตัวมีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (แขนละ 1 ตัว รวม 2 แขน) และอิเล็กตรอนที่เหลืออีก 2 ตัวไม่ได้มีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (non bonding orbital) ความแตกต่างของวัสดุสองตระกูลนี้ ได้แก่ การมีและไม่มีวงโคจรชนิด non bonding วงโคจรชนิด non bonding นี้มีอิทธิพลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุมาก เช่น ความคล่องตัวของโฮล และความหนาแน่นของสถานะ (density of state) โดยทั่วไปความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์ (Valence band) หรือแถบคอนดักชัน (Conduction band) จะมีรูปร่างเป็นพาราโบลาคล้ายของผลึก ดังรูปที่ 2.2(ก) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

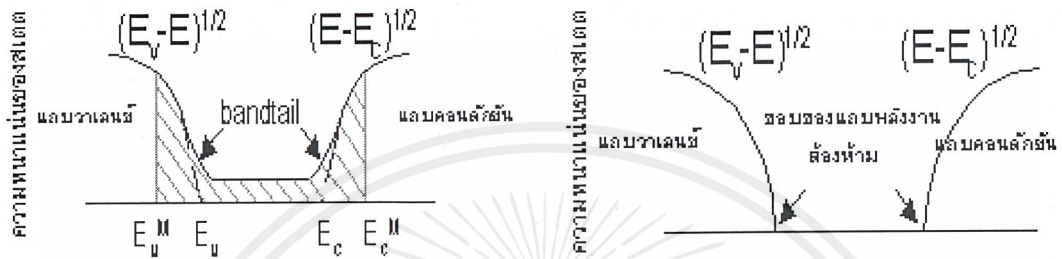
$$g_v(E) \approx (E_v - E)^{1/2}$$

$$g_c(E) \approx (E - E_c)^{1/2}$$

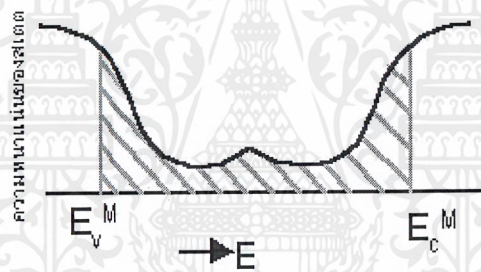
โดยที่ g_v คือ ความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์
 g_c คือ ความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบคอนดักชัน
 E_v คือ พลังงานที่ขอบของแถบวาเลนซ์
 E_c คือ พลังงานที่ขอบของแถบคอนดักชัน
 E คือ ระดับพลังงาน

สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจะมีความหนาแน่นของสถานะภายในแถบพลังงานต้องห้าม ค่อยๆลดลงจากบริเวณคล้าย band edge และลดลงเรื่อยๆสู่ใจกลางของแถบพลังงานต้องห้าม เราเรียกสถานะที่ลดลงอย่างช้าๆนี้ว่า หางของแถบพลังงาน (band tail) เรียกสถานะที่อยู่ภายในแถบต้องห้ามว่า โลคอลลൈส์สเตต (localized states) และเรียกสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์และภายในแถบคอนดักชันว่า ดีโลคอลลൈส์สเตต (delocalized states) ดังรูปที่ 2.2(ข) ที่กล่าวมานี้เป็นกรณีที่เหมาะสมที่ไม่มีจุดบกพร่อง (defects) อยู่ในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส แต่ในสภาพความเป็นจริง

ในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจะมีจุดบกพร่องที่เกิดจากแขนขาดเสมอ การมีแขนขาดจะส่งผลให้เกิดโลคอไลต์สเตต เพิ่มขึ้นภายในแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งมักจะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่ใกล้หางของแถบคอนดักชัน หรือหางของแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 2.2(ค)



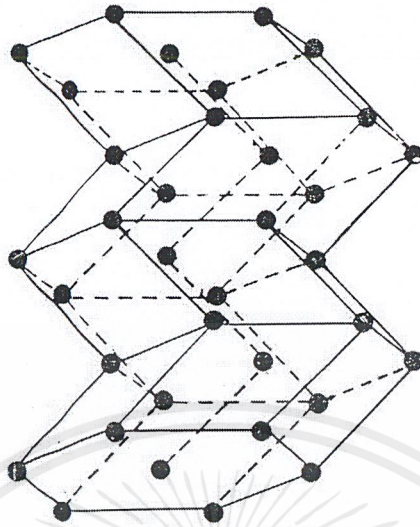
(ก) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส (ข) แถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำ



(ค) ลักษณะของระดับโลคอไลต์สเตตในแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบลักษณะของแถบพลังงานต้องห้าม

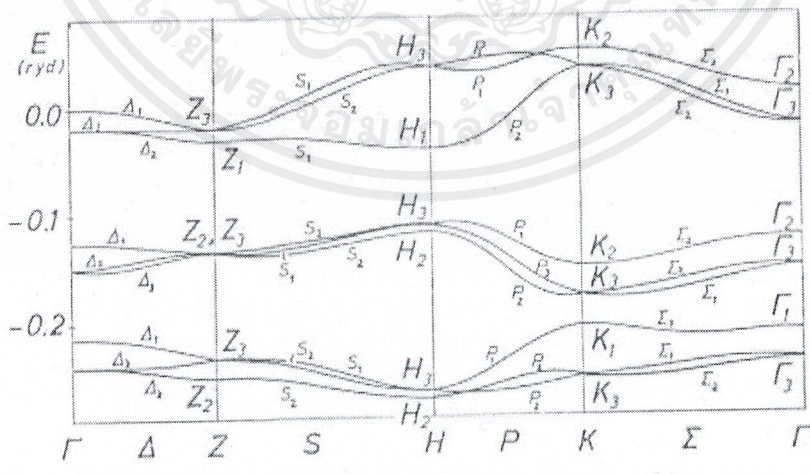
2.1.3 ทฤษฎีเฮกซะโกนอลซีลีเนียม

ซีลีเนียมที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลหรือไตรโกนอล จะประกอบไปด้วยอะตอม 8 อะตอมเรียงตัวกันแบบ Long helical chain โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ และมีโครงสร้างผลึกแบบ face center cubic (fcc) แสดงดังรูปที่ 2.3

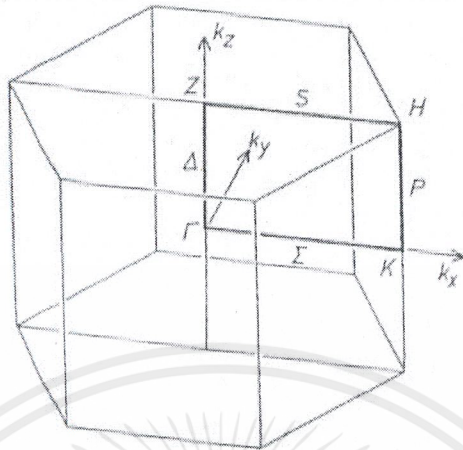


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของเฮกซะโกนอนอลซีลีเนียม

จากรูปพบว่าระยะห่างระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดสองอะตอม มีค่า 2.373 อังสตรอม
 พันระทำมุมกัน 103.1 องศา ระยะห่างระหว่างอะตอมสี่อะตอมบนสาย (Chain) ถัดมามีค่า 3.436
 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่สองบนสายเดียวกันมีค่า 3.716 อังสตรอม
 โครงสร้างแถบพลังงาน และบริเวณโซนของเฮกซะโกนอนอลซีลีเนียม แสดงดังรูปที่ 2.4



(ก) โครงสร้างแถบพลังงาน



(ข) ปริยวงโซน (brillouin zone)

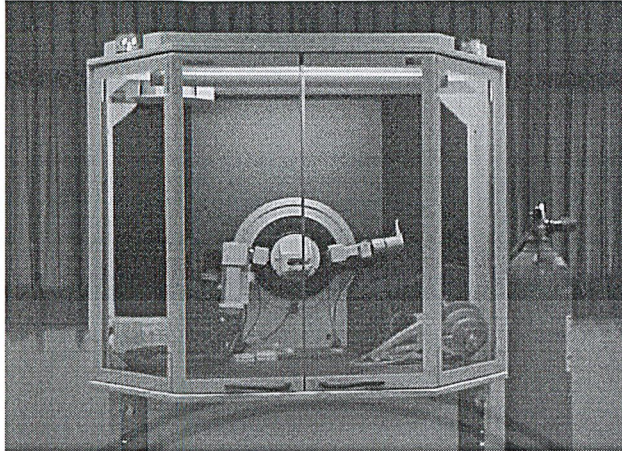
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน และ ปริยวงโซนของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม

จากรูป พบว่าที่แกน H จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน อยู่บนแกนเดียวกัน แสดงถึงความเป็นแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง และมีค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งได้จากผลต่างระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันบนแกน H เท่ากับ 1.79 eV

2.2 ทฤษฎีในการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้วิธี θ - 2θ ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (θ - 2θ Diffractometer Method) เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (ความยาวคลื่น 0.1542 nm) ตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือวัสดุหลายผลึกก็ได้ ซึ่งตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ลักษณะของเครื่องมือที่ใช้เป็นดังรูปที่ 2.5



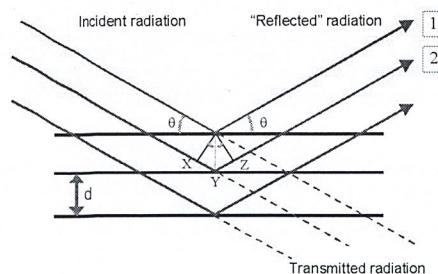
รูปที่ 2.5 X-Ray diffractometer

กฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ถ้าหากความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง (path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

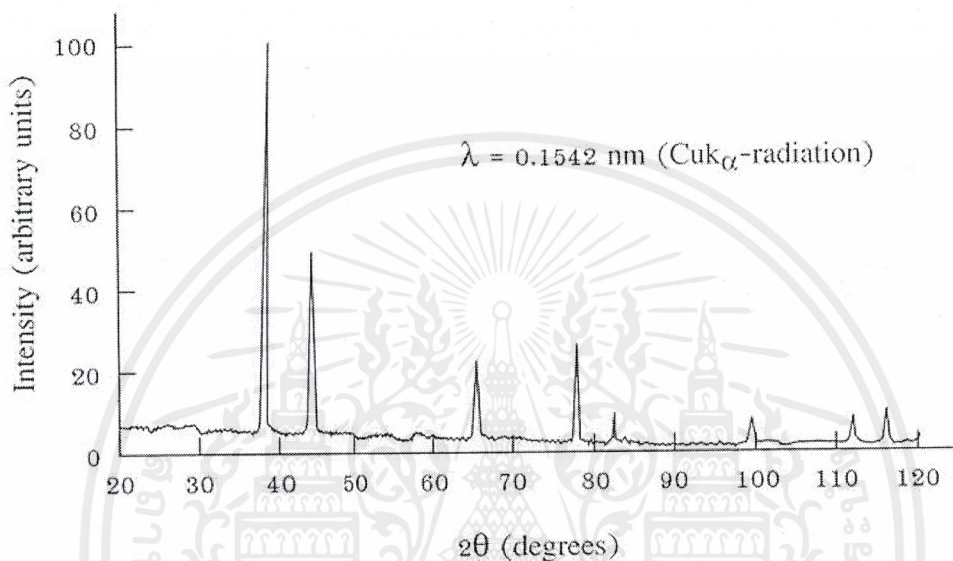
- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
 n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
 λ คือ ความยาวคลื่น



รูปที่ 2.6 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ แล้วระเห็จออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน



รูปที่ 2.7 รูปแบบของการเลี้ยวเบน

รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบของการเลี้ยวเบน(Diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมี Diffraction pattern ต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากยอด (peak)ในDiffraction pattern สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นสามารถตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก Diffraction pattern กับ Powder Diffraction File (PDF) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุที่ได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือ หรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับการอ้างอิง

ฐานข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

1. เซตและหมายเลขไฟล์ (set and file number)
2. พีคที่มีความเข้มมากที่สุด 3 ลำดับแรก (three strongest lines)
3. พีคที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (lowest-angle line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สูตรเคมีและชื่อสาร (chemical formula and name of substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนที่ใช้ (data on diffraction method used) เช่น แหล่งกำเนิดเอกซเรย์และฟิลเตอร์ เป็นต้น
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (crystallographic data) เช่น รูปร่างผลึก และ ขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่นๆ (optical and other data)
8. ข้อมูลของตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์ (data on specimen)
9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซเรย์ของวัสดุ (diffraction pattern) จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I_0) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพีคที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก (hkl)

2.2.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope: EM) เครื่องแรกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1930 โดย Manfred Von Ardenne ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบโดยทั่วไประหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) มีความคล้ายคลึงกันแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะมีความซับซ้อนมากกว่า และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นจะมีการเตรียมต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ตัวอย่างจะต้องแห้งและนำไฟฟ้า และเนื่องจากระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศและใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการกำเนิดภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าจะส่งผลให้อิเล็กตรอนบางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่างทำให้เกิด charging effects ถ้าอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนไปจากบริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก และจากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กครอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะกำลังเคลื่อนที่ ทำให้เราสามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้ โดยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จากลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่างซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มบางแล้ว โดยจะให้

อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (Fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกรูปถ่ายไมโครกราฟ (Micrograph) ได้โดยตรง

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ CRT (cathode ray tube) ซึ่งมีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยายประมาณ 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงานของกล้องชนิดนี้คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) ขึ้น โดยจับสัญญาณได้ด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

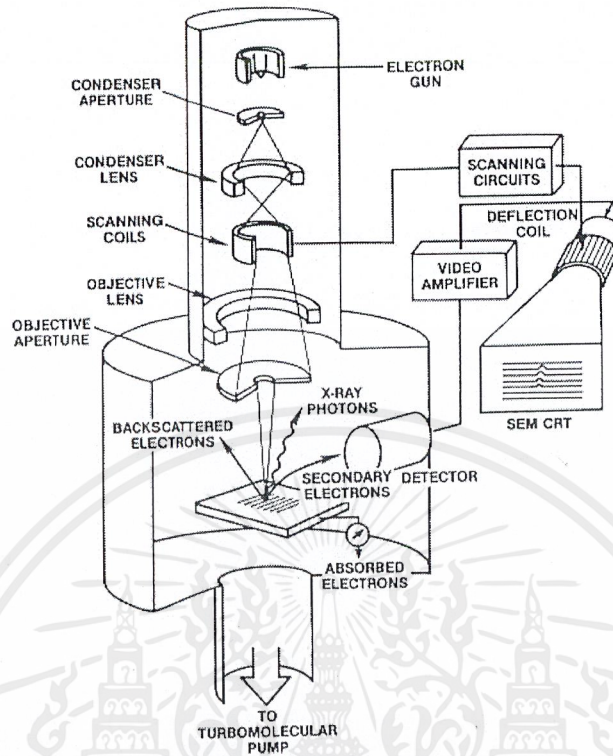
การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ จึงทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มของอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอน โดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดคือ การเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะออกมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง โดยสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่างบริเวณชั้นอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และเนื่องจากสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมินั้นมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อย เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

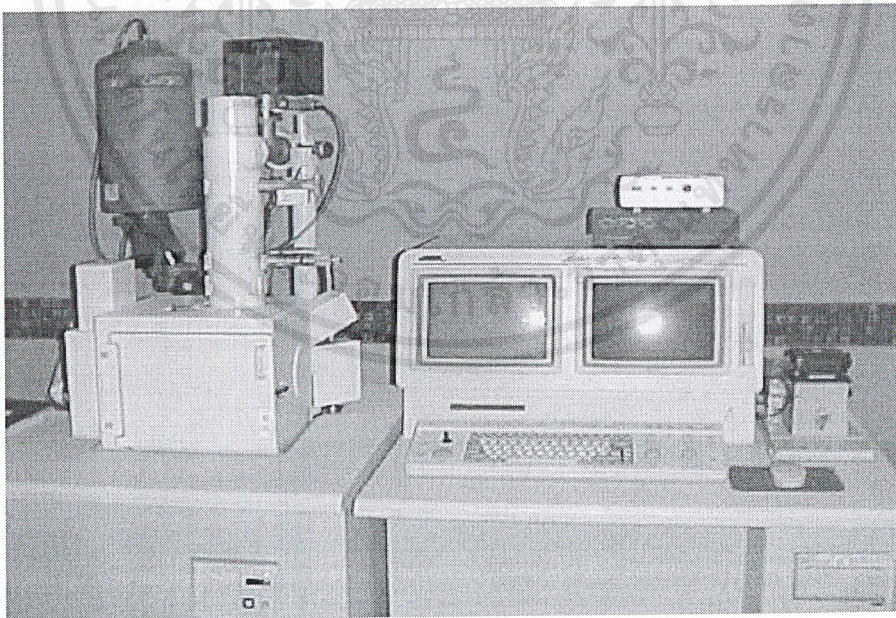
สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่าง หลังจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบอัสไว้ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบาง ทำหน้าที่เป็น collector จากนั้นทำการไบอัสศักดาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบอัสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกวาดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกวาดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกวาดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์นี้ เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่การกวาดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุด Scanning coils เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกวาดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกวาดที่มีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกวาด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกวาด ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะการถ่ายภาพพื้นผิวแต่ในปัจจุบันมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สารตัวอย่างขึ้นอีกโดยการเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้น หนึ่งในเครื่องมือที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือ เครื่องสเปกโทรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน(EDS) ซึ่งทำหน้าที่วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าตัวอย่างได้

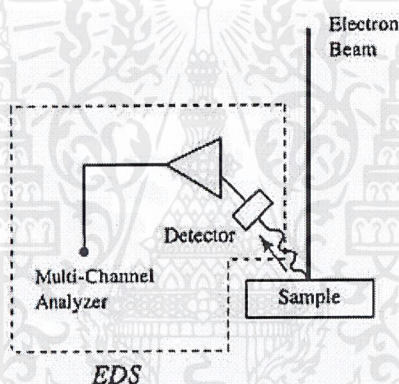
หลักการทำงานของเครื่องสเปกโทรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานจะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์แล้วยิงกราดลงไปบนผิวตัวอย่าง แต่จะต่างกันที่การเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาใช้งาน ความต่างของผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ โดยสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แต่สำหรับเครื่องสเปกโทรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานจะเลือกรังสีเอกซ์มาใช้งาน

เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกยิงลงบนตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ รวมถึงรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray) ด้วยลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจรทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกมีพลังงานมากกว่าจึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (X-ray) เช่น อิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็จะมาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นโคจร (Electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นๆ จึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์สามารถ

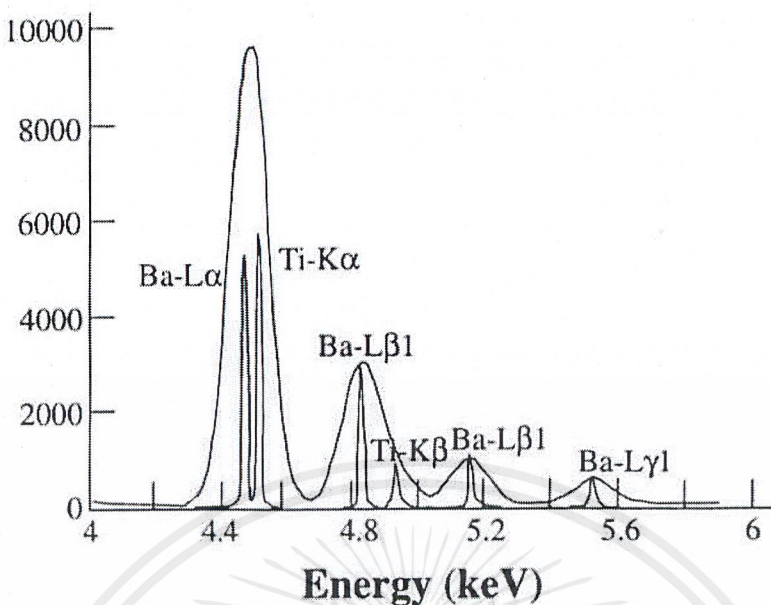
บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยมานี้จะถูกตรวจจับโดยซิลิกอนดีเทคเตอร์ (Silicon detector) และส่งต่อไปยัง charge-sensitive amplifier ที่ทำหน้าที่แปลงและขยายสัญญาณเป็น voltage pulse เมื่อสัญญาณถูกขยายแล้วสัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งไปยัง Multichannel Analyzer (MCA) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบและแบ่งแยกสัญญาณจากวงจขยายสัญญาณ จากนั้นจึงบันทึกค่าสัญญาณแต่ละค่าลงในช่องสัญญาณ (Appropriate channel) ซึ่งมีมากถึง 1000 ช่องสัญญาณ และในแต่ละช่องสัญญาณจะแสดงถึงค่าของพลังงานของรังสีเอกซ์ แสดงไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

ลักษณะของการแสดงผลการตรวจสอบจะมีลักษณะเป็นฮิสโตแกรม (Histogram) แต่เนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณนั้นมีมาก ทำให้ลักษณะของฮิสโตแกรมมีความต่อเนื่อง แสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน ดังรูปที่ 2.11

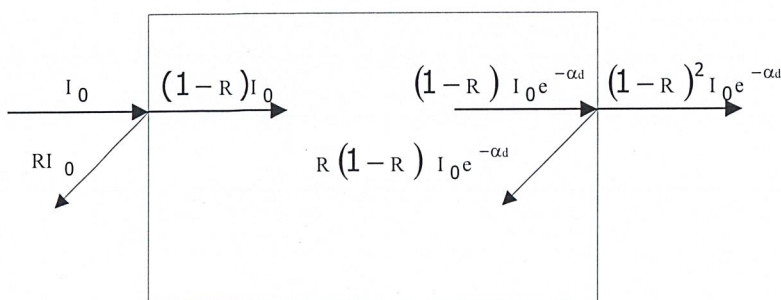


รูปที่ 2.11 การแสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

2.2.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำนั้น เราจะทำการวัดวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสง และการเปล่งแสง ซึ่งจะทำให้เราทราบค่าระดับพลังงานของ localized states และได้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าแถบพลังงานต้องห้าม เนื่องจากทั้งการดูดกลืนแสง และการเปล่งแสงเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานใดๆ หรืออยู่ที่ localized states ดูดกลืนแล้วคายแสงออกแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลง (transitions) ระดับพลังงาน ซึ่งค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนทีอิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมา

เมื่อแสงเดินทางไปที่ตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุ แสงบางส่วนจะเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุแล้วถูกวัสดุดูดกลืนแล้วทะลุผ่านออกมา ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ
 I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ
 I_t คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง R (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง T (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} \quad R = \frac{I_r}{I_0}$$

ดังนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่วัสดุจึงมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R) I_0$$

จากนั้น เมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุ แสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่า แสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง d

- ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มของแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุ คือ

$$I_t = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha d}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{T}{(1 - R)^2} \right)$$

- ในกรณีที่สมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะด้านผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น ความเข้มของแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุ คือ

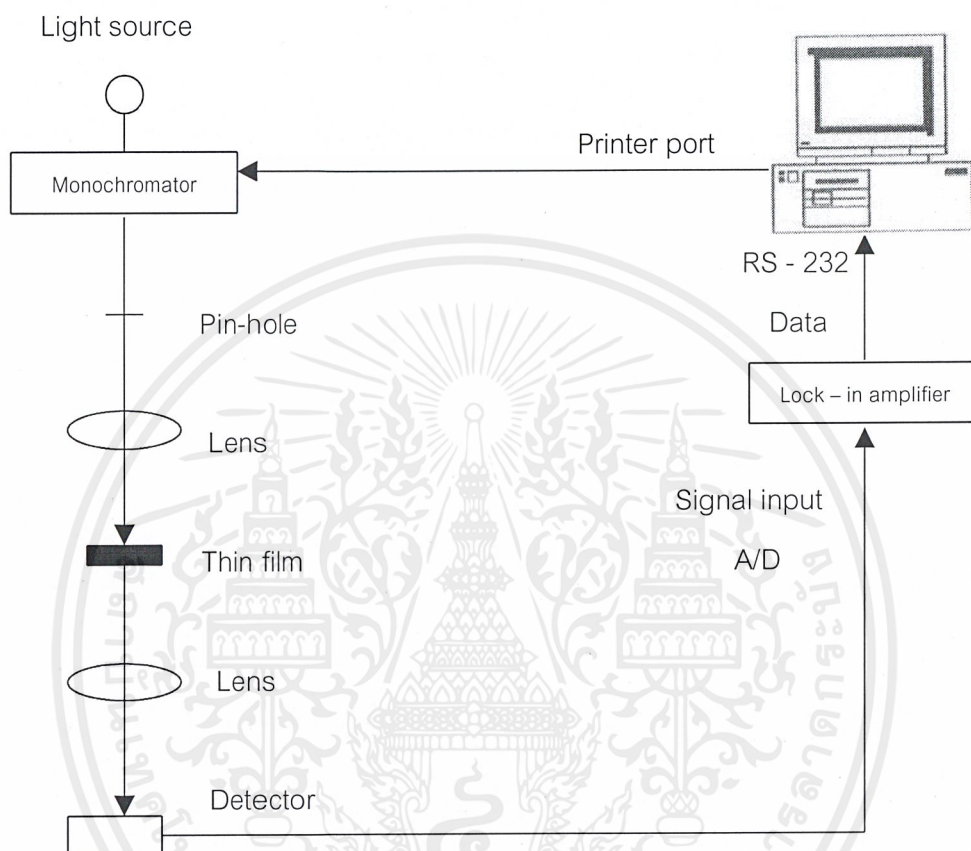
$$I_t = (1 - R) I_0 e^{-\alpha d}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{T_1}{1 - R} \right)$$

ในการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงที่ตกกระทบและทะลุผ่านฟิล์มบางนั้น เราจะใช้ระบบวัด Transmittance Spectroscopy ในการวัด

องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง โมโนโครเมเตอร์ ตัวตัดแสง ตัวตรวจจับสัญญาณ เลนส์ แผ่นยึดสาร เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน และไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งจัดเรียงไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 2.13 ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

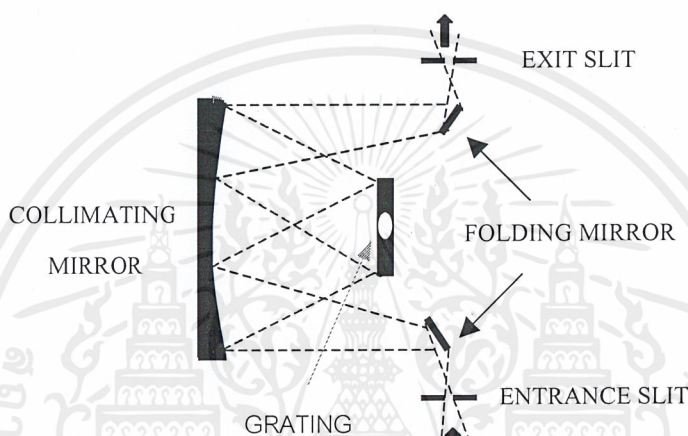
องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง โมโนโครเมเตอร์ ตัวตรวจจับสัญญาณ เลนส์ แผ่นยึดสาร เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สเตป ینگมอเตอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์ แสดงไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 2.13

- แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ได้ผลิตจากทังสเตน (Tungsten) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 200-2,200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

- โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยโดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์แสดงในรูปที่ 2.14 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (Slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบบนที่คอลลิเมตติ้ง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆตามการตกกระทบบนเกรตติง และแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมตติ้งสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงโดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์

- ตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

- เลนส์ (Lens)

ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดความยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางและความเหมาะสมของระบบวัด ในงานวิจัยนี้ใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร

- แท่นยึดสาร

ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับมุมของการสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ

- เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเป็นสัญญาณ A/D เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมี 4 ช่องสัญญาณ ในงานวิจัยนี้ใช้เพียง 1 ช่องสัญญาณ

- สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor)

ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของเกเรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์โดยการสั่งงานควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบฟูลสเตปนั้นเป็นการสั่งงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมกันที่เดียวสองเฟส (Two - excitation) คือคู่เฟสระหว่างเฟส 1-2,2-3,3-4 และ 4-1 หมุนเวียนกันไปโดยค่าของแต่ละสเตปคือ

0 0 1 1 0 0 1 1 (เฟส 1-2)

0 1 1 0 0 1 1 0 (เฟส 2-3)

1 1 0 0 1 1 0 0 (เฟส 3-4)

1 0 0 1 1 0 0 1 (เฟส 4-1)

- ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer)

ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกเรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบลือคอินโดยผ่านทาง RS-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูล

2.2.5 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม

การดูดกลืนแสงในผลึกสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนรับพลังงานจากแสงแล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันซึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนสถานะชนิดจากแถบถึงแถบ (Band-to-band transition) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ ซึ่งแสดงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ของเช่นนี้เรียกว่า "ขอบการดูดกลืนแสง"(optical absorption edge)

พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับความแตกต่างของจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำต้องเป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมซึ่งแสดงด้วยเวกเตอร์ k นั่นก็คือ

ถ้าการดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่มีค่า k เท่ากัน เราเรียกรูปการดูดกลืนแสงเช่นนี้ว่า "การดูดกลืนชนิดตรง" (direct absorption) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานคือ

$$\alpha(\hbar\omega) = A (\hbar\omega - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad \text{cm}^{-1}$$

และสามารถหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามได้จาก การเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha(\hbar\omega)^2$ และ $\hbar\omega$ ซึ่งค่าแถบพลังงานต้องห้าม ก็คือ ค่าพลังงานโฟตอนที่เส้นตรงลากไปตัดกับ แกนนอนนั่นเอง

แต่ถ้าจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันมีค่า k ไม่ตรงกัน ในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนเพื่อดูดกลืนแสงจะต้องอาศัย "โฟนอน" ช่วย กล่าวคือ อิเล็กตรอน ต้องมีการดูดความร้อนจากโครงผลึกหรือคายความร้อนให้แก่โครงผลึก เราเรียกรูปการดูดกลืนแสง เช่นนี้ว่า "การดูดกลืนชนิดไม่ตรง" (indirect absorption) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานคือ

$$\alpha = B(\hbar\omega - \varepsilon_{gi} - \varepsilon_p)^2 + C(\hbar\omega - \varepsilon_{gi} + \varepsilon_p)^2 \quad \text{cm}^{-1}$$

โดย ε_p : พลังงานโฟนอน

ε_{gi} : ช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง

เมื่อเรานำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha^{1/2}$ และ $\hbar\omega$ จะพบว่ากราฟ $\alpha^{1/2}$ มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่เปลี่ยนความลาดอย่างรวดเร็วจนที่ $\varepsilon_{gi} - \varepsilon_p$ และ $\varepsilon_{gi} + \varepsilon_p$

จากระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงในหัวข้อที่แล้วทำให้เราทราบค่า $T_1(\lambda)/T_0(\lambda)$ ซึ่งสามารถนำไปหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสได้ดังนี้

ถ้าฟิล์มบางอะมอร์ฟัสมี สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเท่ากับ $\alpha(\lambda) (\text{cm}^{-1})$

ความหนาเท่ากับ $d(\text{cm})$

สัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ $R(\lambda)\%$

และสมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะด้านผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง $T(\lambda)\%$ ดังนี้

$$T_1(\lambda) = (1 - R(\lambda)) \cdot \frac{I_0(\lambda)}{I_i(\lambda)} e^{-\alpha(\lambda)d}$$

ถ้าสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงมีระดับพื้นหลัง(background) เท่ากับ $T_0(\lambda)\%$ ดังนั้น

$$T_0(\lambda) = (1 - R(\lambda)) \cdot \frac{I_0}{I_i}$$

ฉะนั้น

$$\frac{T_1(\lambda)}{T_0(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)d}$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{T_0(\lambda)}{T_1(\lambda)}\right)$$

แต่เพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่เราวัดออกมาได้จากระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง จึงแปลงสมการเป็น

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{T_1(\lambda)}{T_0(\lambda)} \right)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha(\bar{h}\omega)^2$ และ $\bar{h}\omega$ ค่าพลังงานโฟตอนที่เส้นตรงลากไปตัดกับแกนนอนคือค่าแถบพลังงานต้องห้าม นั่นเอง

$\alpha(\bar{h}\omega)^2 (cm^{-1})$



E_g

$\bar{h}\omega (eV)$

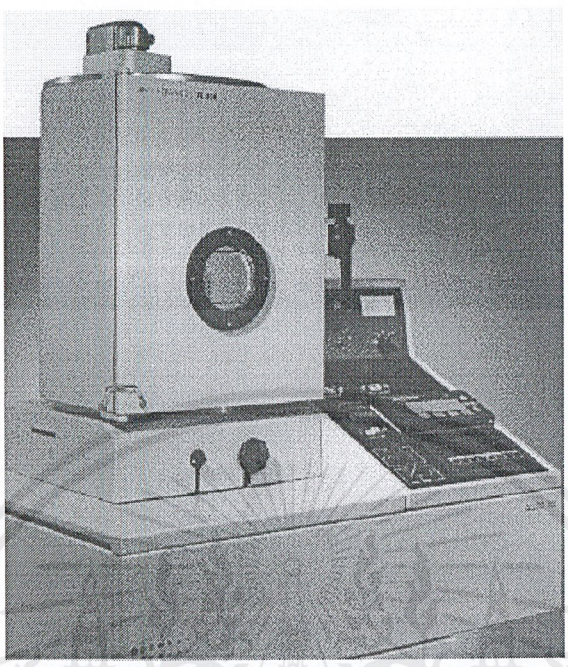
รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha(\bar{h}\omega)^2$ และ $\bar{h}\omega$

บทที่ 3

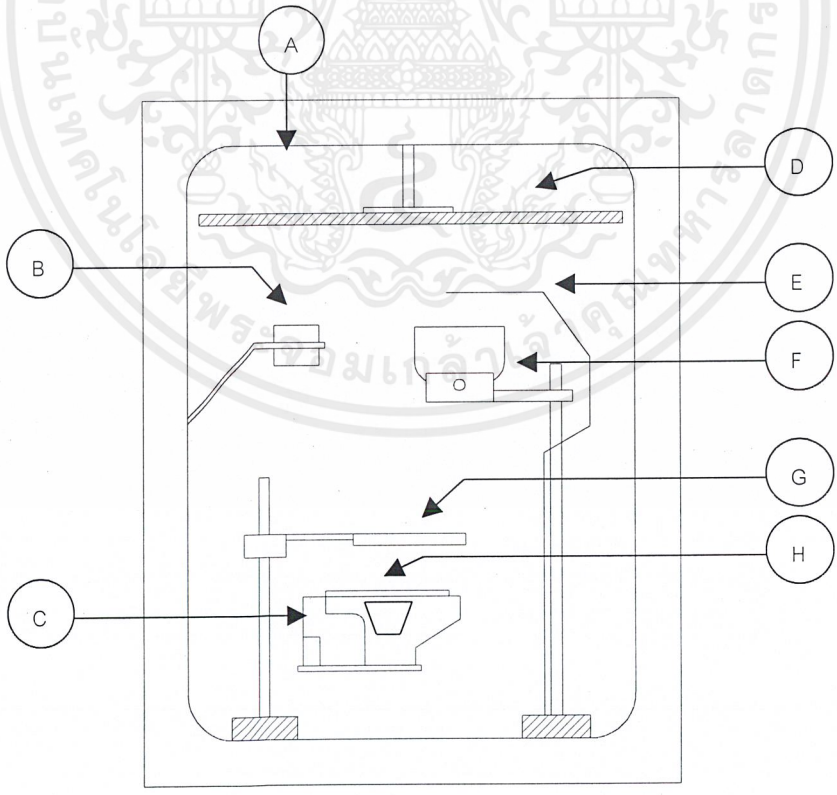
ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

หลักการการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง เริ่มจากการทำ การดูดอากาศภายในห้องสุญญากาศ(Chamber) ซึ่งในการเคลือบสารด้วยลำอิเล็กตรอนนั้นเรา จะต้องทำในระบบสุญญากาศสูง คือมีความดันประมาณ $10^{-5} - 10^{-6}$ มิลลิบาร์(mbar) โดยใช้ปั๊ม โมเลกุลเทอร์โบ(Turbomolecular Pump) ในการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยมีปั๊มกล โรตารี (Rotary Pump) เป็นตัวช่วยดูดอากาศออกจากปั๊มโมเลกุลเทอร์โบอีกที เมื่อระบบทำ ความดันได้ตามที่ต้องการแล้ว เราจะทำการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ ตกลงบนสารซีลีเนียมบริสุทธิ์(99.995%) ซึ่งลำอิเล็กตรอนนั้นเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ ขดลวดทั้งสแตน จนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสิชัน(Thermionic emission)ของอิเล็กตรอน ขึ้น เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบลงบนผิวหน้าของสารซีลีเนียม อิเล็กตรอนจะถ่ายเทพลังงานจลน์ ที่มีอยู่ในตัวไปเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นไอระเหยของสารซีลีเนียมจะระเหยขึ้นไปเคลือบบน แผ่นรองรับที่อยู่ด้านบนกลายเป็นฟิล์มบางซีลีเนียม ซึ่งขณะที่ไอระเหยของสารซีลีเนียมขึ้นไป เคลือบบนแผ่นรองรับนั้น จะมีไอระเหยของสารซีลีเนียมส่วนหนึ่งที่ขึ้นไปเกาะติดบนคริสตอลด้วย ส่งผลให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถนำมาคำนวณหา ความหนาของฟิล์มบางได้



รูปที่ 3.1 แสดงระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง



รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 องค์ประกอบของเครื่องระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง จะประกอบไปด้วย

- A คือ ห้องสุญญากาศ
- B คือ Crystal sensor
ทำหน้าที่วัดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อคำนวณความหนาของสารที่เคลือบได้
- C คือ Source electron beam
ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- D คือ Workholder plate
ทำหน้าที่เป็นที่วางแผ่นรองรับและหมุนแผ่นรองรับขณะที่ทำการเคลือบ
- E คือ Thermocouple
ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิแผ่นรองรับ
- F คือ Heater
ทำหน้าที่เป็นตัวให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับ ทั้งขณะทำการเคลือบและหลังการเคลือบ ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิได้ตั้งแต่ 27- 250^oC
- G คือ Shutter
ทำหน้าที่ปิดกั้นไอระเหยของสารซีลีเนียม
- H คือ Crucible
ทำหน้าที่เป็นภาชนะใส่สารซีลีเนียม ทำจากวัสดุแกรไฟต์(graphite)ที่สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 2000^o C

3.2 เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง

ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง โดยแบ่งเงื่อนไขในการเตรียมออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ

1. เงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นรองรับที่ต่างกัน

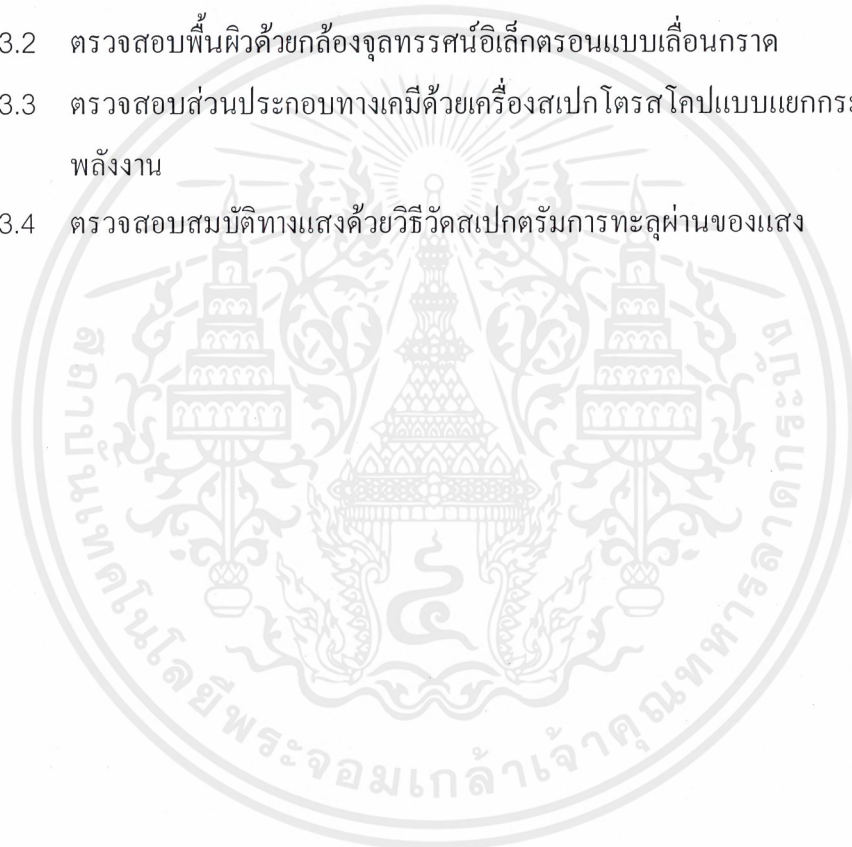
ทำการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนา 1 μm โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับค่าต่างๆ ได้แก่ 60^oC , 80^oC, 100^oC, 120^oC และ 150^oC

2. เงื่อนไขของความหนา

ทำการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C โดยมีความหนาต่างๆ ได้แก่ ความหนา $2\ \mu\text{m}$, $2.5\ \mu\text{m}$ และ $3\ \mu\text{m}$

3.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้

- 3.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 3.3.2 ตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเถื่อนกราด
- 3.3.3 ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน
- 3.3.4 ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง



บทที่ 4

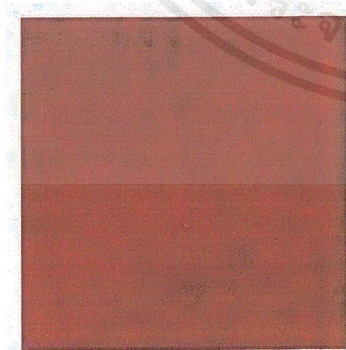
ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง เมื่อเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการแล้ว นำฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน และการตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้ามโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

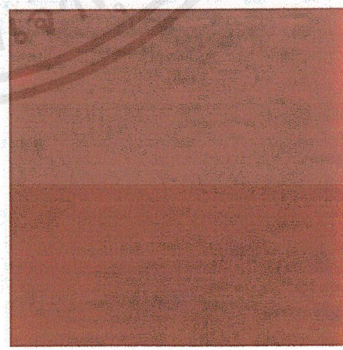
4.1 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

ทำการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนา $1 \mu\text{m}$ โดยให้อุณหภูมิแผ่นรองรับค่าต่างๆ ได้แก่ 30°C , 60°C , 80°C , 100°C , 120°C และ 150°C ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

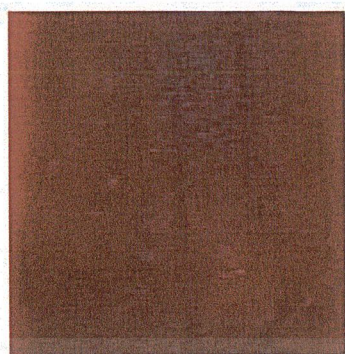
4.1.1 ลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้



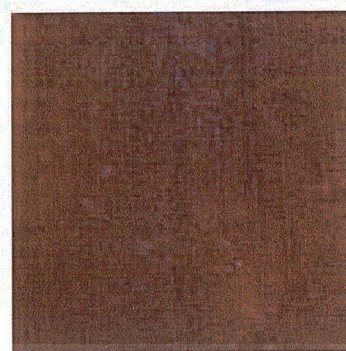
(ก) อุณหภูมิ 30°C



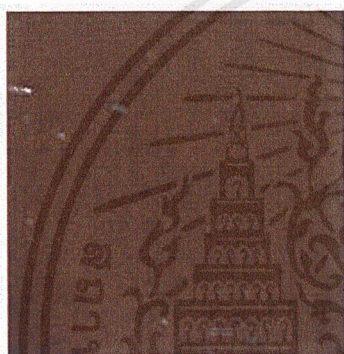
(ข) อุณหภูมิ 60°C



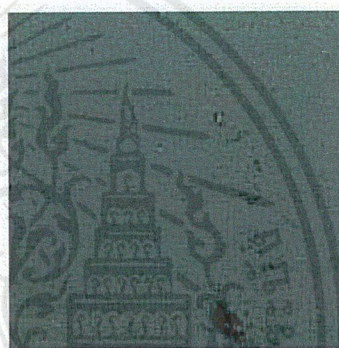
(ค) อุณหภูมิ 80° C



(ง) อุณหภูมิ 100° C



(จ) อุณหภูมิ 120° C

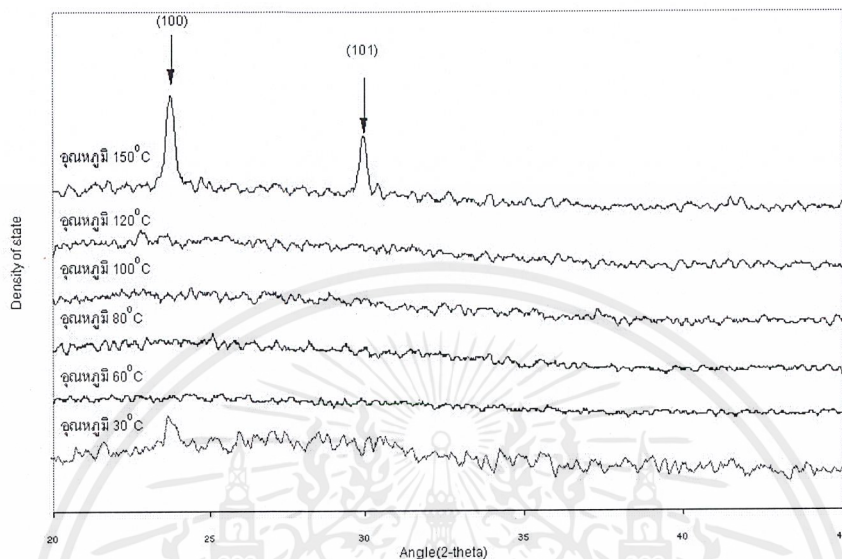


(ฉ) อุณหภูมิ 150° C

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

จากการสังเกตลักษณะและสีของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ พบว่า ฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30° C-120° C มีสีแดง และฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150° C มีสีเทา

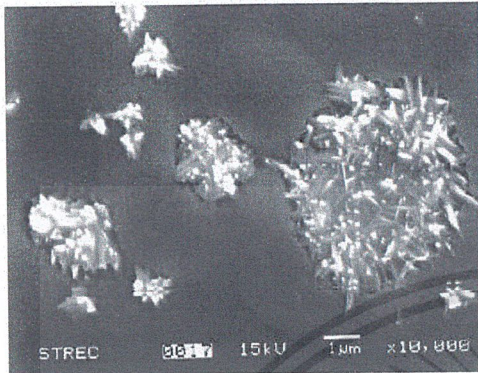
4.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



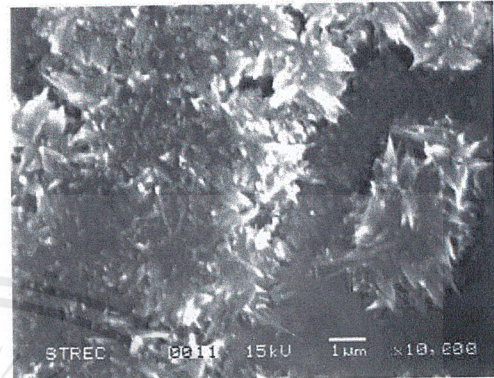
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซีลีเนียม ที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C - 120°C มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอะมอร์ฟัส และฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีพีคของระนาบ (100) และ (101) เกิดขึ้นที่มุม 23.8 องศา และ 29.9 องศา ตามลำดับ เมื่อนำไปตรวจสอบกับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล

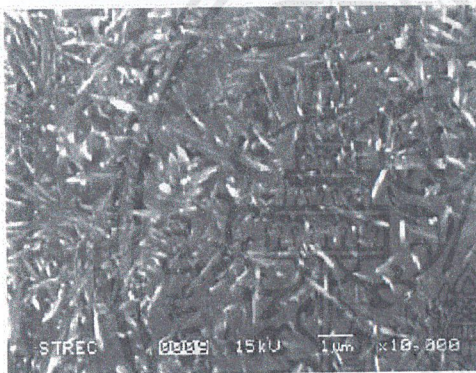
4.1.3 ผลการตรวจสอบภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



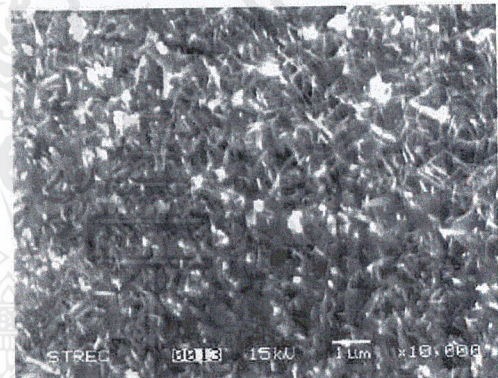
(ก) อุณหภูมิ 30°C



(ข) อุณหภูมิ 60°C



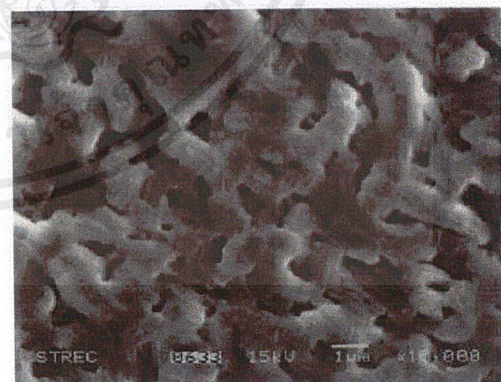
(ค) อุณหภูมิ 80°C



(ง) อุณหภูมิ 100°C



(จ) อุณหภูมิ 120°C



(ฉ) อุณหภูมิ 150°C

รูปที่ 4.3 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

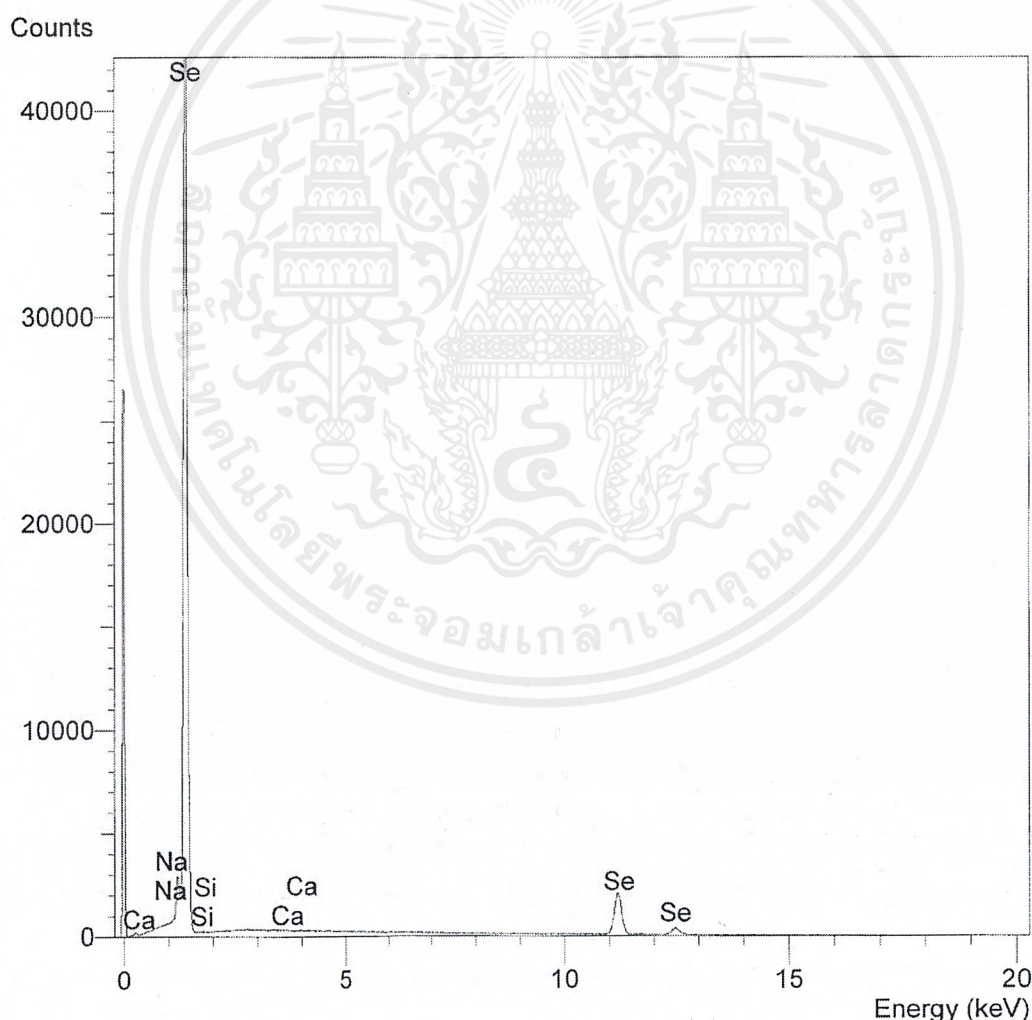
จากการสังเกตลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ พบว่า ฟิล์มบางซีลีเนียมมีภาพพื้นผิวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งผลได้นั้นสอดคล้องกับผลจากวิธีการเลี้ยวเบนของรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกซ์ นั้นคือ พิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ $30^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$ มีลักษณะภาพพื้นผิวเป็นแบบอะมอร์ฟัส และฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีภาพพื้นผิวเป็นลักษณะกลุ่มก้อนของผลึก

4.1.4 ผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซีลีเนียมโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

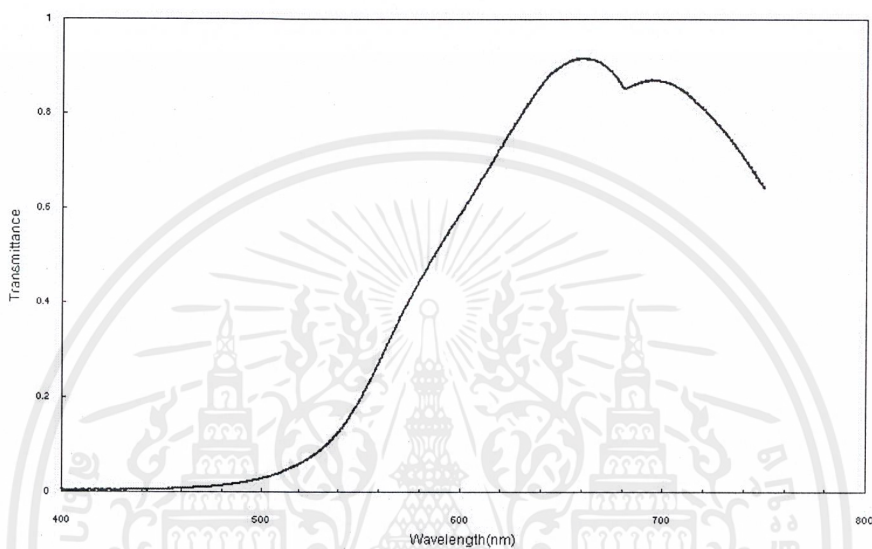
จากนั้นนำฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C ไปตรวจองค์ประกอบทางเคมีเพื่อดูว่าภายในเนื้อฟิล์มที่เตรียมได้และมีโครงสร้างเป็นผลึกนั้น มีสารชนิดอื่นเข้าไปเจือปนหรือไม่ ซึ่งได้ผลการตรวจสอบดังนี้



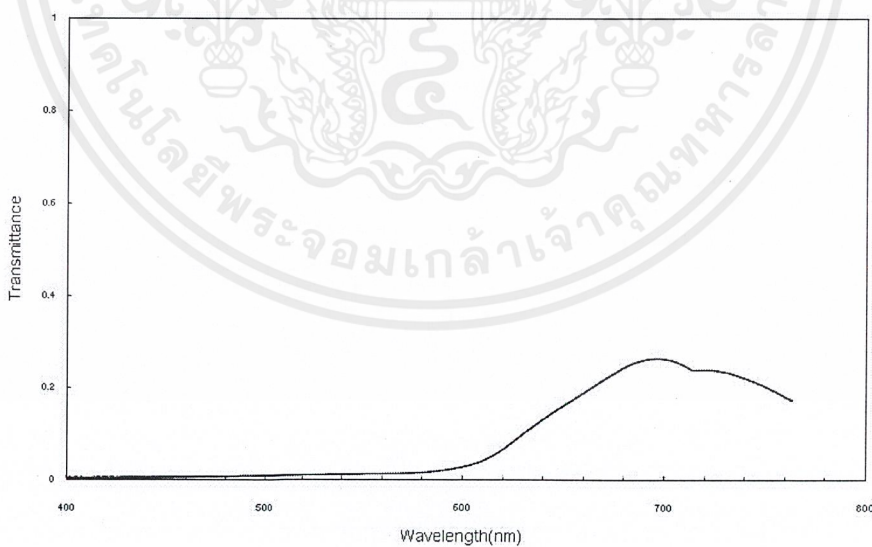
รูปที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

จากการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน พบว่า ไม่มีสารประกอบทางเคมีชนิดอื่นเข้าไปเจือปนในเนื้อฟิล์มซีดีเนียมที่เตรียมได้

4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง



(ก) อุณหภูมิ 30°C – 120°C



(ข) อุณหภูมิ 150°C

รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซีดีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

จากการตรวจสอบการทะลุผ่านของแสง พบว่า ฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ $30^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$ ยอมให้แสงทะลุผ่านได้มาก และฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C ยอมให้แสงทะลุผ่านได้น้อย ซึ่งสังเกตได้จาก กราฟสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ $30^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$ มีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านมากกว่า 150°C

4.1.6 ผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซีลีเนียม

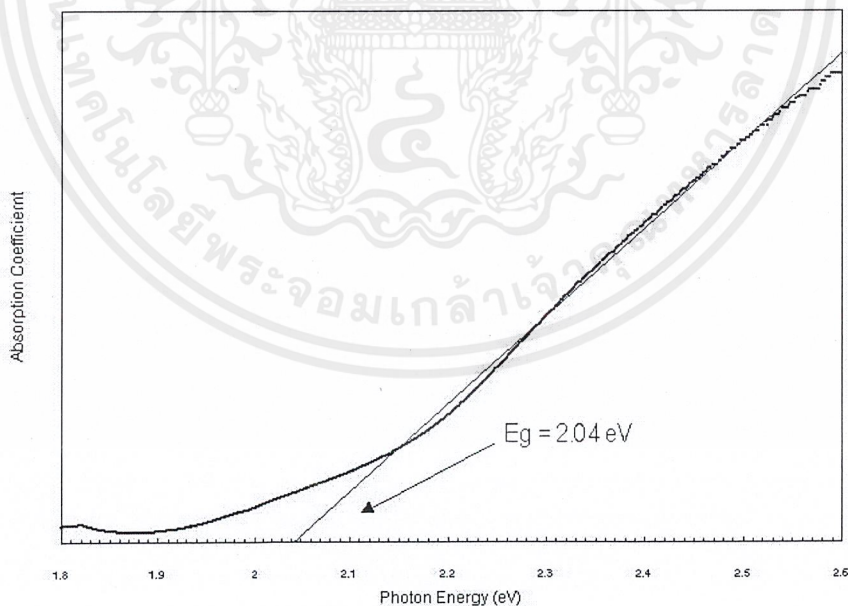
จากค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่ได้จากวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง เราสามารถนำมาคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้จากสมการ

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T$$

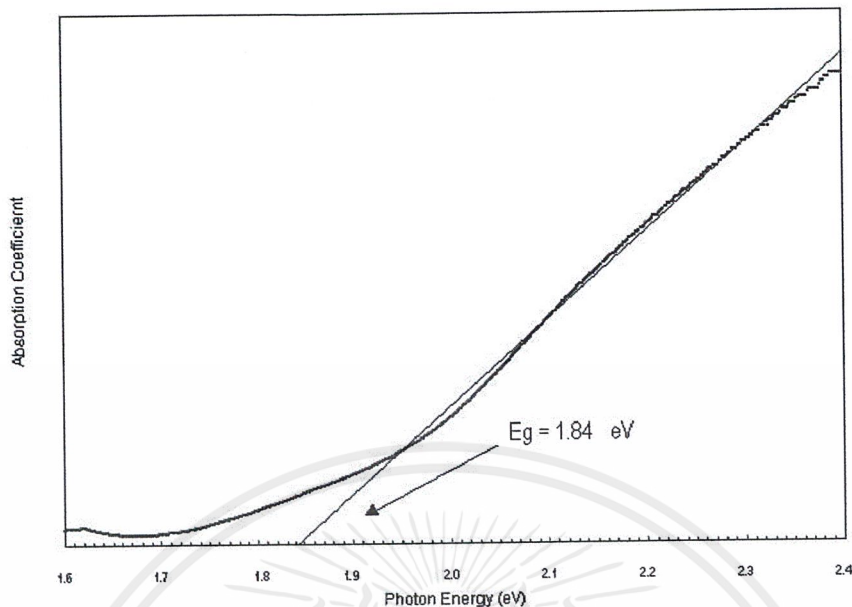
และสามารถหาค่าพลังงานโฟตอนได้จากสมการ

$$E = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \quad (\text{eV})$$

จากนั้นนำค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และ ค่าพลังงานโฟตอน (E_g) มาเขียนกราฟ ได้ผลดังนี้



(ก) อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$



(ข) อุณหภูมิ 150°C

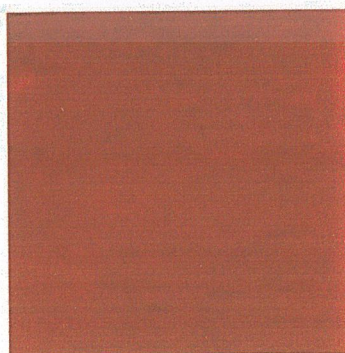
รูปที่ 4.6 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน

จากผลการหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม พบว่า ฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C - 120°C มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 2.04 eV และฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1.84 eV

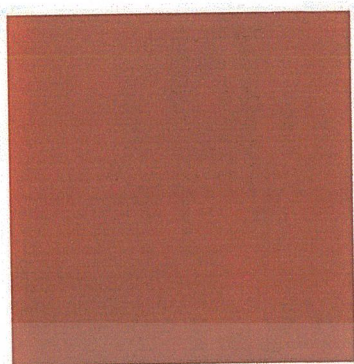
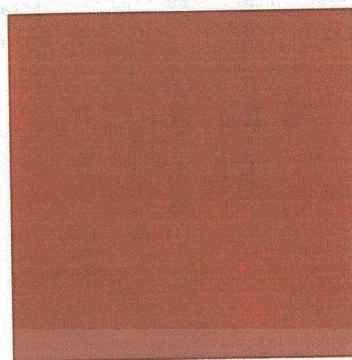
4.2 การเตรียมฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีความหนาต่างกันที่อุณหภูมิห้อง

ทำการเตรียมฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C ที่ความหนาต่างๆ ได้แก่ 2 μm , 2.5 μm และ 3 μm ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางซิลิเนียมที่เตรียมได้



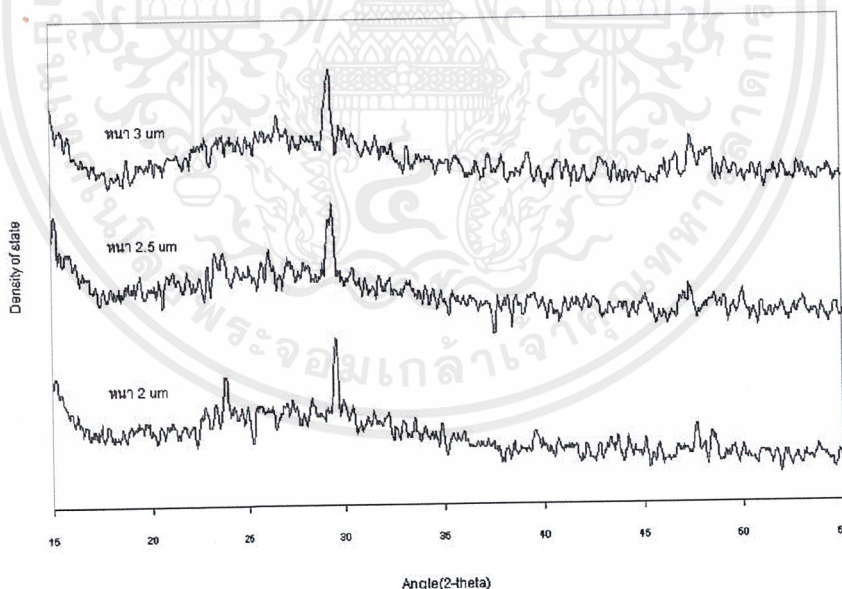
(ก) ฟิล์มหนา 2 μm

(ก) फिल्मหนา 2.5 μm (ค) फिल्मหนา 3 μm

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน

จากการสังเกตลักษณะและสีของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ พบว่า ความหนาไม่มีผลต่อสีของฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ เนื่องจากสีของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีสีแดงเหมือนกัน

4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

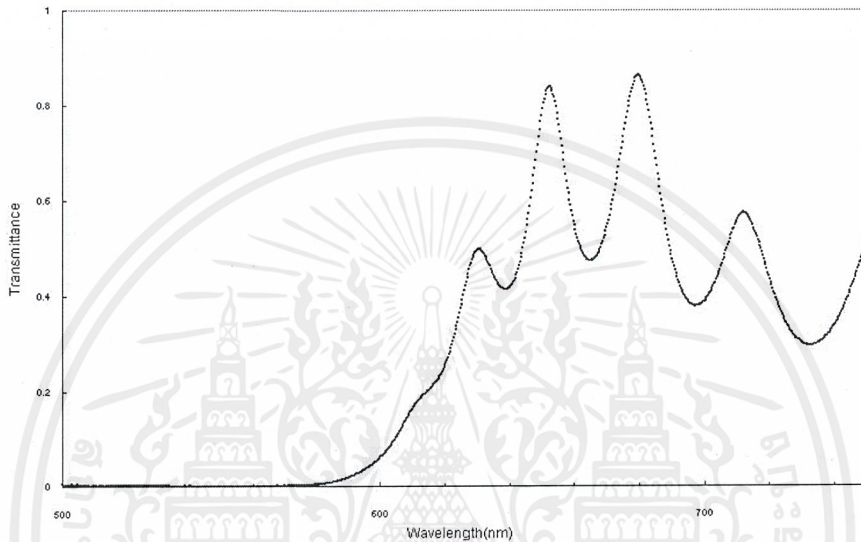


รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างกัน

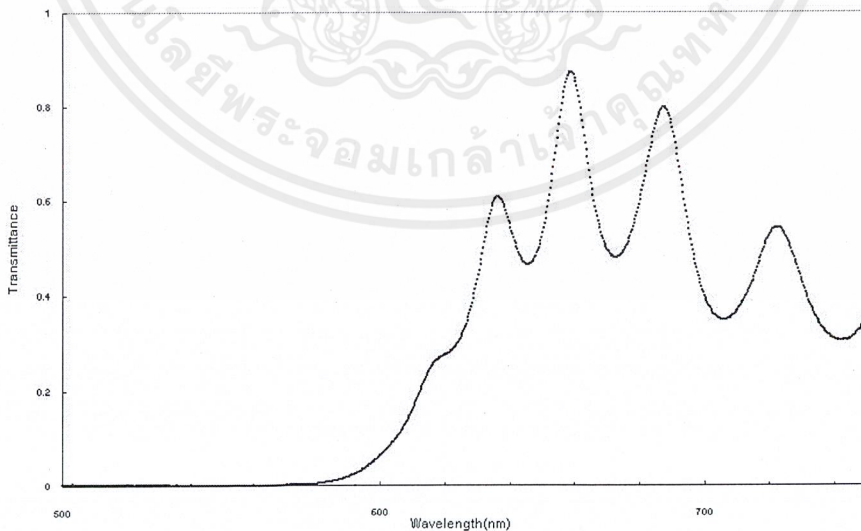
จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีพีคเกิดขึ้น ซึ่งมีค่าความสูงของพีค (Intensity) น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า ความหนาของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มี

อุณหภูมิ 30°C ไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึก กล่าวคือ ฟิล์มบางซีดีเนียมที่เตรียมได้นี้ยังคงมีโครงสร้างเป็นแบบอะมอร์ฟัส

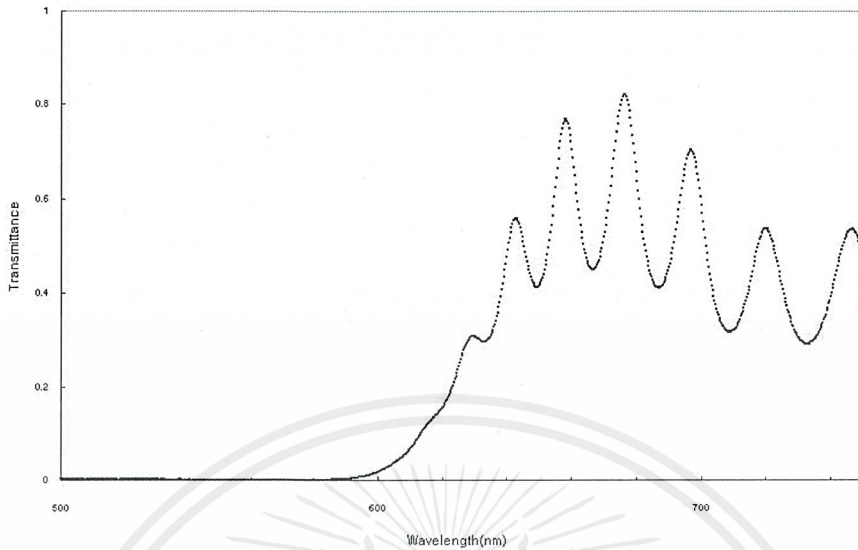
4.2.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง



(ก) ความหนา $2\ \mu\text{m}$



(ข) ความหนา $2.5\ \mu\text{m}$



(ค) ความหนา 3 μm

รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิลิเนียม
ที่มีความหนาต่างกัน

จากการตรวจสอบการทะลุผ่านของแสง พบว่า สเปกตรัมการทะลุผ่านที่วัดได้มีลักษณะ
สูงต่ำเป็นช่วงๆ ซึ่งเกิดเนื่องจากการแทรกสอดของแสงในฟิล์มบางซิลิเนียม โดยค่าสัมประสิทธิ์
การทะลุผ่านที่สูงหรือต่ำนั้นจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่มีค่าเป็นสี่เท่าของความหนา
ของฟิล์ม และที่ความยาวคลื่นที่มีส่วนเป็นจำนวนเลขคี่ของความยาวคลื่นดังกล่าว

4.2.4 ผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางซิลิเนียม

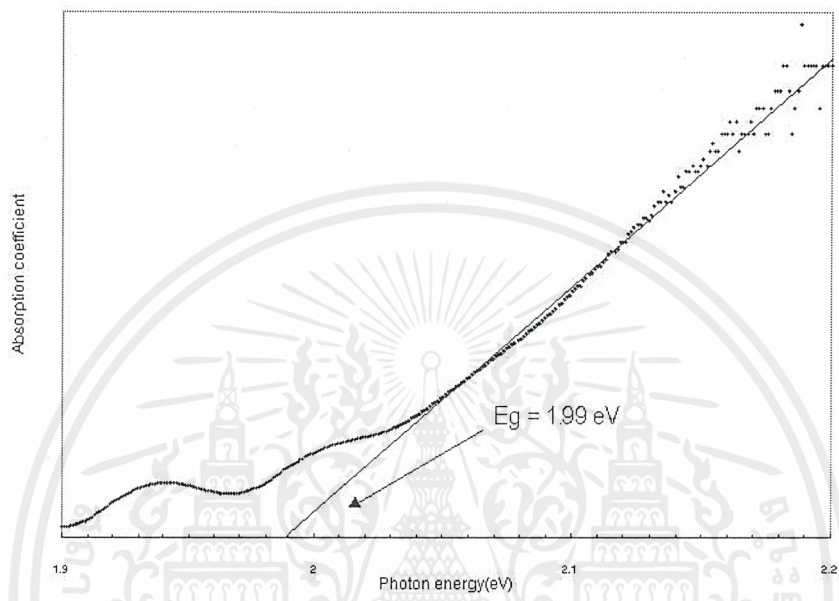
จากค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่ได้จากวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง เรา
สามารถนำมาคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้ จากสมการ

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T$$

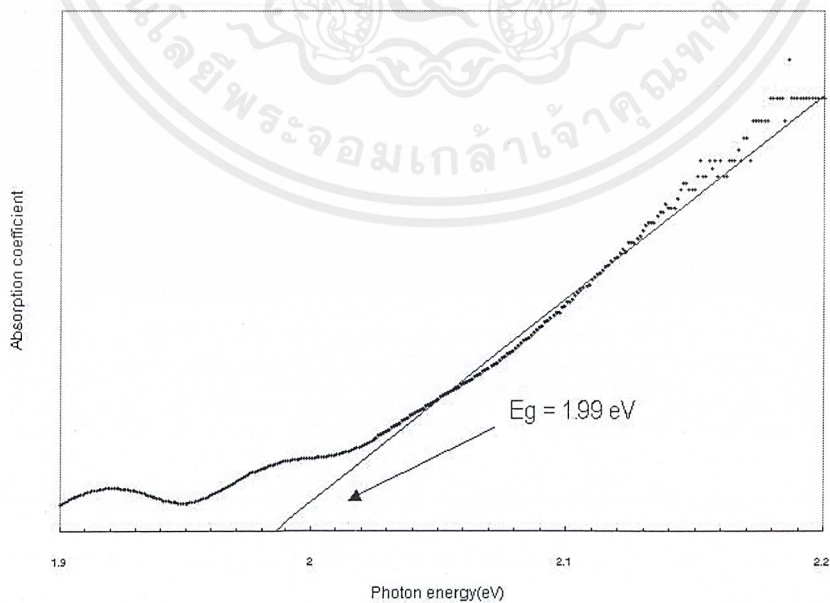
และสามารถหาค่าพลังงานโฟตอนได้ จากสมการ

$$E = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \quad (\text{eV})$$

จากนั้นนำค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และ ค่าพลังงานโฟตอน (E_g) มาเขียนกราฟ ได้ผลดังนี้

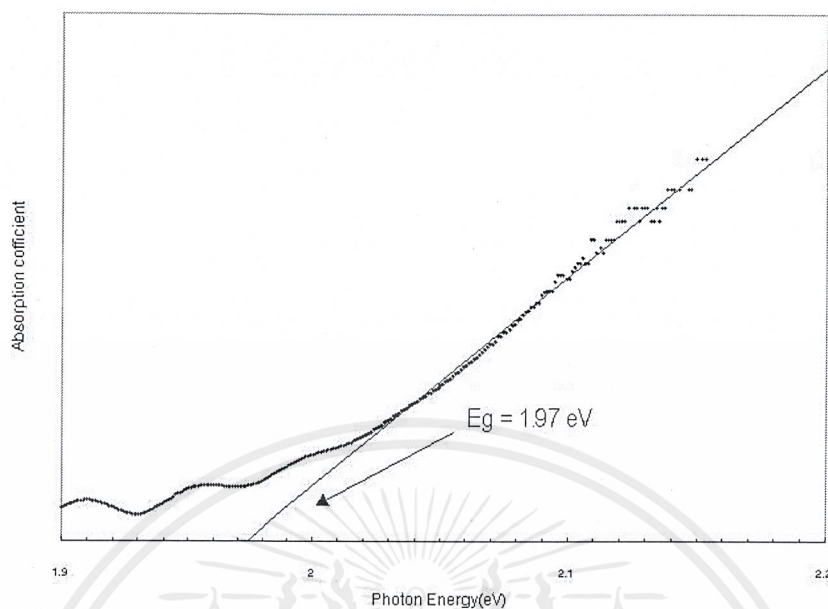


(ก) फिल्मหนา 2 μm



(ข) फिल्मหนา 2.5 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) फिल्मหนา 3 μm

รูปที่ 4.10 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีความหนาต่างกัน

จากผลการหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม พบว่า ฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีความหนาต่างกันนี้มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1.98 eV

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างๆ พบว่า อุณหภูมิที่ให้แก่แผ่นรองรับมีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางซิลิเนียม กล่าวคือ เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่า ฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C - 120°C มีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัสซิลิเนียม และฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีลักษณะเป็นเฮกซะโกนอลซิลิเนียม และเมื่อทำการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับค่าต่างๆนั้น พบว่า ฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 30°C - 120°C มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 2.04 eV และฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีอุณหภูมิแผ่นรองรับ 150°C มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1.84 eV

และจากการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางซิลิเนียมที่มีความหนาต่างๆ พบว่า ความหนาของฟิล์มบางมีผลต่อการแทรกสอดของฟิล์มบางซิลิเนียม จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธี

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า फिल्मบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ทุกๆความหนามีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัสซีลีเนียม และเมื่อทำการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างๆพบว่า फिल्मบางซีลีเนียมที่มีความหนาต่างๆกันนั้น มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 1.98 eV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว, การพัฒนาระบบประเหยในสุญญากาศควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์, คอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เวิร์ด, ฉบับที่ 129, 2533, หน้า 59-74
2. รศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม, โซลิตสเททฟิสิกส์, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ
3. รศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ
4. รศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ
5. เดโช ทองอร่าม, จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนสำหรับงานด้านวัสดุศาสตร์, กรุงเทพฯ
6. ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ, การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน, สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ
7. ศุภสโรช หมื่นสิทธิ์, ฟิสิกส์ของวัสดุ, กรุงเทพฯ
9. รศ. สุวรรณ คู่อำราญ, ทัศนศาสตร์กายภาพ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่1, กรุงเทพฯ
10. สุพรรณิ แจ่มสว่าง, การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนิลซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ , วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
11. W. Charles Cooper, The Physics of Selenium & Tellurium, Newyork
12. Dr. Jiti nukeaw, Band Gap Measurement with Transmittance Spectroscopy

ภาคผนวก

ฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม

Pattern : 6-362		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
Se		2th	l	h	k	l
Selenium, syn / Selenium		23.517	55	1	0	0
Lattice : Hexagonal		29.706	100	1	0	1
S.G. : P3121 (152)		41.305	16	1	1	0
a = 4.36620	Z = 3	43.649	35	1	0	2
c = 4.95360		45.354	20	1	1	1
OPTICAL DATA : B=3.0, Q=4.04, Sign=+		48.104	4	2	0	0
METING POINT : 220°C		51.721	20	2	0	1
COLOR : Dark gray		55.660	10	0	0	3
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample from Mallinckrodt Chemical Works.		56.141	12	1	1	2
ANALYSIS : Spectroscopic analysis : <0.01%Al, Si;		61.211	8	1	0	3
<0.001%B, Ba, Ca Cu, Fe; <0.0001%Ag, Bi, Cd, Li.		61.662	10	2	0	2
TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 26°C.		65.238	10	2	1	0
SAMPLE PREPARATION : Sample annealed at 155°C for 16 hours.		68.255	4	2	1	1
UNIT CELL DATA : Two other forms, monoclinic and cubic have been reported.		71.590	6	1	1	3
ADDITIONAL PATTERN : To replace 42-1425		76.517	2	2	0	3
CAS : 7782-49-2		76.882	4	2	1	2
*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 0, page 54, (1955)		78.153	4	3	0	1
primary reference :		81.757	6	1	0	4
Swanson et al.		86.618	4	3	0	2
*Dana's System of Mineralogy, 7 th Ed., volume 0, optical data :		90.998	6	2	1	3
Radiation : CuKα1	Filter : Beta	95.994	2	2	0	4
Lambda : 1.54050	d-sp : Not given	97.316	2	3	1	1
SS/FOM : F23=27(0.0290,30)		106.880	2	1	0	5

ตารางที่ 1 ฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม