การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสาร ด้วยความร้อนในสุญญากาศ

A CHARACTERIZATION STUDY OF ANNEALED-Se THIN FILMS PREPARED BY THE VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

สุพรรณี แจ่มสว่าง

SUPANNEE JAMSAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-567-9

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสาร ด้วยความร้อนในสุญญากาศ

A CHARACTERIZATION STUDY OF ANNEALED-Se THIN FILMS PREPARED BY THE VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

T042550

สุพรรณี แจ่มสว่าง

SUPANNEE JAMSAWANG

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 42550
วัน, เดือน, ปี 31 พ.ค. 2545
.b..........
.i..........

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-567-9

A CHARACTERIZATION STUDY OF ANNEALED-Se THIN FILMS PREPARED BY THE VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD

SUPANNEE JAMSAWANG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2002

ISBN 974-648-567-9

COPYRIGHT 2002
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้ ... ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
นักศึกษา	นางสาวสุพรรณี แจ่มสว่าง
รหัสประจำตัว	41065008
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องบนแผ่นรองรับที่เป็นแก้ว แอนนีลในอากาศอุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 - 363 เคลวิน ผลจากการตรวจสอบโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด เมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 323 เคลวิน แสดงโครงสร้างของฟิล์มบางเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous : a-Se) และเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิสูงกว่า 323 เคลวิน จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal : γ-Se) แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมตรวจสอบโดยวิธีการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง พบว่าแถบพลังงานต้องห้ามของ a-Se มีค่า 2.1 eV และ γ-Se มีค่า 1.83 eV สมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) ตรวจสอบโดยการวัดค่าความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบ พบว่าค่าความต้านทานของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้าง MSM ลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียลกับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Characterization Study of Annealed-Se Thin Films Prepared by the Vacuum Thermal Evaporation Method
Student	Ms. Supannee Jamsawang
Student ID.	41065008
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2002
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Jiti Nukeaw

ABSTRACT

The annealed-Se thin films have been prepared by the vacuum thermal evaporation method on glass substrate at room temperature. The temperature of annealing in air is changed from 300 K to 363 K. The annealed-Se thin film is investigated by X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). XRD and SEM show the thin film structure as amorphous thin film (a-Se) with the annealed temperature below 323 K, while show the hexagonal structure as γ-Se thin film with the annealed temperature above 323 K. The energy gap of annealed-Se thin films is investigated by transmittance spectroscopy. The energy gap of a-Se is about 2.1 eV, while γ-Se is 1.83 eV. The electrical property of fabrications of annealed-Se Metal-Semiconductor-Metal (MSM) structure is investigated by resistance measurement with light intensity. The resistance of annealed-Se MSM device decrease exponentially with increasing light intensity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ แนวความคิดแก้ไขปัญหา และสนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในการสนับสนุนงานวิจัยด้วยดี ขอขอบพระคุณทุนการศึกษาจากสภาสถาบันราชภัฏ โครงการพัฒนาการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ในสถาบันราชภัฏ (โครงการ พวส.) ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆพร้อมทั้งช่วยเทียบแก้ไขทฤษฎีและอื่นๆที่ผิดพลาด จนสมบูรณ์ยิ่งขึ้นและยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกท่านในครอบครัว ที่สนับสนุนการศึกษาและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุพรรณี แจ่มสว่าง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....II

กิตติกรรมประกาศ....III

สารบัญ....IV

สารบัญภาพ....VII

คำนำ....IX

บทที่ 1 บทนำ....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย....2

1.3 การดำเนินงานวิจัย....2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย....2

บทที่ 2 ทฤษฎี....4

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารซีลีเนียม....4

2.1.1 อะมอร์ฟัสซีลีเนียม....4

2.1.1.1 สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะมอร์ฟัสซีลีเนียม....6

2.1.1.2 แบบจำลองของแถบพลังงาน....7

2.1.2 เฮกซะโกนอลซีลีเนียม....9

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์....12

2.3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด....16

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด....16

2.3.2 เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน....20

2.4 การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง....22

2.5 ทฤษฎีการหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม....27

2.6 ทฤษฎีการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย....34

3.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยเทคนิคระเหยสารในระบบสุญญากาศ....34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 ขั้นตอนการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม..........37

3.3 ขั้นตอนในการเตรียมและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ..........39

3.3.1 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ..........39

3.3.2 ขั้นตอนในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ..........40

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..........41

4.1 การทดลองการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม..........41

4.1.1 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียม..........41

4.1.2 การเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม..........42

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม..........43

4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์..........43

4.2.2 การตรวจสอบฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด..........44

4.2.3 การตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน..........48

4.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม..........49

4.3.1 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง..........49

4.3.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยการคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม..........50

4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ..........54

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..........56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..57

เอกสารอ้างอิง..59

ภาคผนวก..61

ประวัติผู้เขียน...64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอม	5
2.2	การสร้างพันธะของอะตอมของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส	7
2.3	เปรียบเทียบลักษณะของแถบพลังงานต้องห้าม	8
2.4	โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	10
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม	11
2.6	แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน และ บริเวณโซนของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม	11
2.7	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	13
2.8	ภาพถ่ายของเครื่องX–Ray diffractometer	15
2.9	Diffraction pattern	16
2.10	องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	19
2.11	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	19
2.12	ไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	21
2.13	การแสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน	21
2.14	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนฟิล์มบาง	22
2.15	แสดงการสะท้อนแสงทั้งที่ผิวด้านหน้าฟิล์มบางและที่ผิวด้านหลังฟิล์มบาง จำนวนครั้งเป็นอนันต์	24
2.16	ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง	24
2.17	แสดงไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์	25
2.18	แสดงไดอะแกรมระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง	26
2.19	แสดงขอบการดูดกลืนแสง	27
2.20	การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน	28
2.21	แสดงกราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง	30
2.22	โครงสร้างทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	31
2.23	ลักษณะขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	31
2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	33
3.1	แสดงภาพถ่ายระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	35
3.2	แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในครอบแก้ว	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.3 องค์ประกอบของระบบการแอนนีล..38

3.4 ภาพถ่ายของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ......................39

4.1 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางซีลีเนียม...41

4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม...42

4.3 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม...44

4.4 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด...45

4.5 แสดงผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน...48

4.6 แสดงสเปกตรัมจากการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม.....50

4.7 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม.....................................51

4.8 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.................................54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันมีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำในรูปของฟิล์มบางเพื่อนำมาใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย ซึ่งฟิล์มบางแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะต่างกันไปตามความเหมาะสมในการใช้งาน จึงมีพัฒนาวิธีการเตรียมและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางวิธีต่างๆ และปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีศักยภาพสูงขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนองานวิจัย การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม ผลของงานวิจัยจะเป็นแนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป รายละเอียดของวิทยานิพนธ์สามารถสรุปแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมรวมถึงวัตถุประสงค์และประโยชน์ของงานวิจัย เพื่อทราบถึงขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของสารซีลีเนียมและหลักการของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

บทที่ 3 กล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมและการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมนุษย์ได้นำประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรม การสื่อสาร และอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันอย่างมากมายผ่านทางอุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าประกอบไปด้วยสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถในการประมวลผล วิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีศักยภาพสูงขึ้นมาโดยตลอด

สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากสร้างจากผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะผลึกของซิลิกอน สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ได้รับการพัฒนามาอย่างรวดเร็วหลังจากที่ W. Shockley ประดิษฐ์ไดโอดและทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จในปี ค.ศ. 1948 และในขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิดผลึกเดี่ยวกำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วัสดุชนิดสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส (Amorphous semiconductor) [1-2] ก็ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเช่นกัน อะมอร์ฟัส มีสมบัติที่เด่นกว่าผลึกหลายประการ เช่น แข็งแกร่ง ทนต่อแรงเสียดทาน และทนต่อปฏิกิริยาเคมี อีกทั้งเป็นวัสดุที่ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ เหมาะแก่การนำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น เซลแสงอาทิตย์ ไดโอดเปล่งแสงชนิดฟิล์มบาง ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง เป็นต้น

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางขึ้นมาหลายวิธี อาทิ Chemical Vapour Deposition (CVD), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE), Organicmetallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE), E-beam evaporator และ RF Sputtering เป็นต้น เพื่อนำไปใช้ในงานวิจัย และงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการสร้างสารกึ่งตัวนำ อุตสาหกรรมการเคลือบเลนส์ อุตสาหกรรมเลนส์กรองแสง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (Vacuum thermal evaporation) [3] ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยการให้ความร้อนเพื่อระเหยสารให้ขึ้นไปเกาะติดบนแผ่นรองรับ (Substrate) การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีนี้จะใช้เวลาในการเตรียมน้อย และทำการเตรียมได้ครั้งละมากๆ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต

การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางนั้นมีวิธีการหลายวิธี เช่น การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X–Ray Diffraction spectroscopy : XRD) [4-5] การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron

Microscope : SEM) [6-7] การตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) โดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง (Transmittance spectroscopy) [8-9] และการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) ตรวจสอบโดยการวัดค่าความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบ ซึ่งวิธีต่างๆ เหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่ถูกเตรียมขึ้น เพื่อป้อนกลับไปสู่การเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดีขึ้น และประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และวิธีการตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง จากนั้นทำการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และนำฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ไปแอนนีลที่อุณหภูมิต่างกัน ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้ามโดยวิธีการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง จากนั้นนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมในข้างต้นประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบ จากการตรวจสอบด้วยวิธีดังกล่าว พบว่าอุณหภูมิที่ใช้แอนนีลมีผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1.4.1 ทำให้ทราบถึงสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสมบัติเฉพาะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม

1.4.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของสารซีลีเนียม และหลักการในการตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด การตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้ามโดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

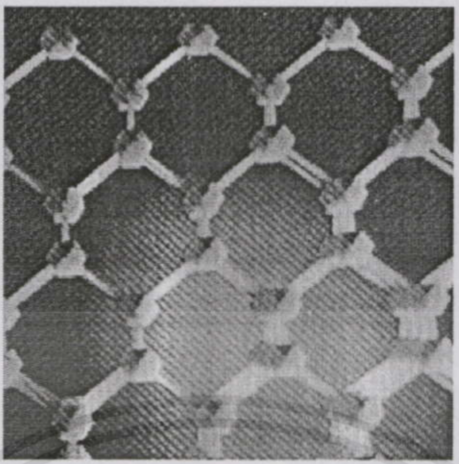
2.1 สมบัติทางกายภาพของสารซีลีเนียม

สารซีลีเนียม [10] จัดอยู่ในธาตุหมู่ที่ VI เลขอะตอม 34 ในธรรมชาติแบ่งสารซีลีเนียมออกเป็น 2 ประเภทคือ อะมอร์ฟัสซีลีเนียม (Amorphous Selenium : a-Se) มีลักษณะเป็นสีแดงและผลึก (Crystalline) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ เฮกซะโกนอลซีลีเนียม (Hexagonal Selenium : γ-Se) มีลักษณะเป็นสีเทา โมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ α (α Monoclinic Selenium : α–Se) และโมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ β (β Monoclinic Selenium : β-Se) มีลักษณะเป็นสีแดง

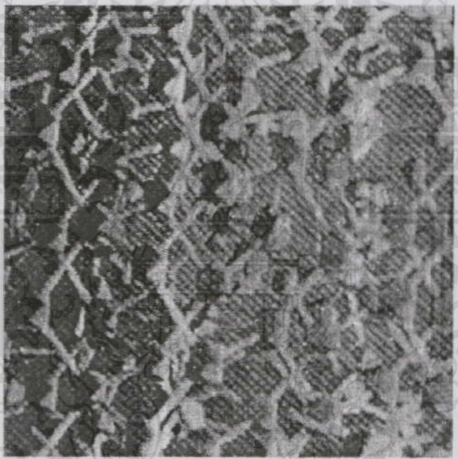
2.1.1 อะมอร์ฟัสซีลีเนียม

อะมอร์ฟัสซีลีเนียม (Amorphous Selenium : a-Se) ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1948 พบว่าอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อถูกฉายด้วยแสง จึงได้มีการนำอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมาประดิษฐ์เป็นดรัมไวแสงในเครื่องถ่ายเอกสาร ต่อมาจึงมีศึกษาสมบัติของอะมอร์ฟัสซีลีเนียมเพิ่มขึ้นพบว่าอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 2.2 eV สมบัติโดยทั่วไปของอะมอร์ฟัสมีลักษณะคล้ายกันคือ อะมอร์ฟัส (Amorphous) หมายถึง สิ่งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (อสัณฐาน) โครงสร้างของอะมอร์ฟัสประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวแต่จะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้น แสดงการเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของอะตอมของวัสดุผลึกเดี่ยวและวัสดุอะมอร์ฟัส ดังรูปที่ 2.1 โดยรูปที่ 2.1 (ก) คือการเรียงตัวของอะตอมของผลึก และรูปที่ 2.1 (ข) คือ การเรียงตัวของอะตอมของอะมอร์ฟัส จะเห็นได้ว่า กรณีผลึกเดี่ยวมีการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ ในขณะที่อะมอร์ฟัสมีการเรียงตัวของอะตอมไม่เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การเรียงตัวของอะตอมของผลึก



(ข) การเรียงตัวของอะตอมของอะมอร์ฟัส

รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอม

การเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นมีผลทำให้วัสดุมีสมบัติคล้ายผลึกที่เกิดจากธาตุเดียวกัน แต่ในขณะเดียวกันเนื่องจากไม่มีการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะยาว วัสดุจึงมีสมบัติที่ต่างไปจากผลึก คือ

1. สามารถเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวทางฟิสิกส์ได้ กล่าวคือ สามารถผลิตวัสดุผสมหรือสารประกอบของธาตุได้ในอัตราส่วนที่เป็นอิสระ ทำให้สามารถผลิตวัสดุที่ผลิตจากผลึกไม่ได้ เช่น ผลึกซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) อัตราส่วนจำนวนของซิลิกอนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1:1 เท่านั้น ในขณะที่อะ

มอร์ฟัสซิลิกอนคาร์ไบด์ (a-$Si_{1-x}C_x$:H) สามารถเปลี่ยนค่า x ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ทำให้สามารถออกแบบและผลิตวัสดุให้มีค่าคงตัวทางฟิสิกส์ได้หลายชนิด เช่น ค่าคงตัวทางแสง ได้แก่ สภาพนำไฟฟ้า ความคล่องตัว ค่าคงตัวทางแสง ได้แก่ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แถบพลังงานต้องห้ามเป็นต้น

2. มีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส เนื่องจากอะตอมเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาว ดังนั้นสมบัติทางฟิสิกส์ของอะมอร์ฟัสจึงเหมือนกันทั้งวัสดุ ในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสไม่มีเกรน (Grain) เส้นพรมแดน (Boundary) และรอยแตก (Cleavage) จึงทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีพื้นที่มากได้ เช่น เซลแสงอาทิตย์ มีความแข็งแกร่งทำให้ทนต่อการเสียดทานได้

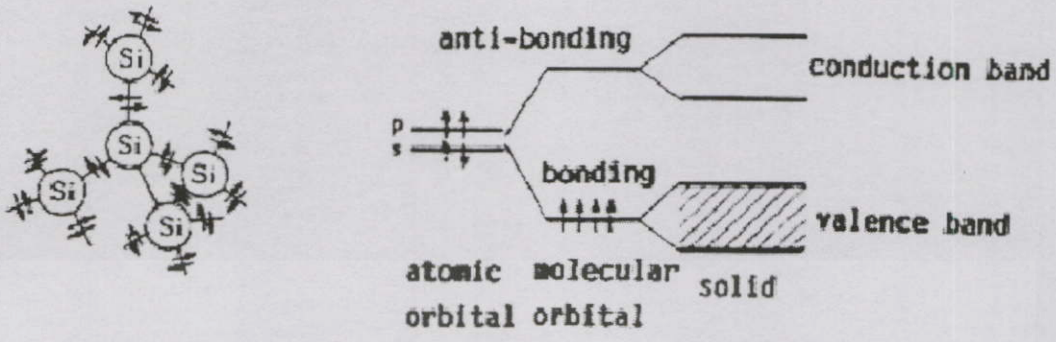
3. สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสอยู่ในภาวะไม่สมดุลเชิงความร้อน เนื่องจากอะตอมเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นพลังงานอิสระ (Free energy) ที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีค่าสูงกว่าในผลึก ทำให้สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีสมบัติไม่สมดุลในเชิงอุณหพลศาสตร์ เมื่อเวลาผ่านไปพลังงานอิสระของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจะค่อยๆลดลงจนเปลี่ยนสภาพไปเป็นผลึกได้ เช่น แก้วบางชนิดเมื่อเวลาผ่านไปหลายพันปีจะค่อยๆเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกได้

2.1.1.1 สมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะมอร์ฟัสซีลีเนียม

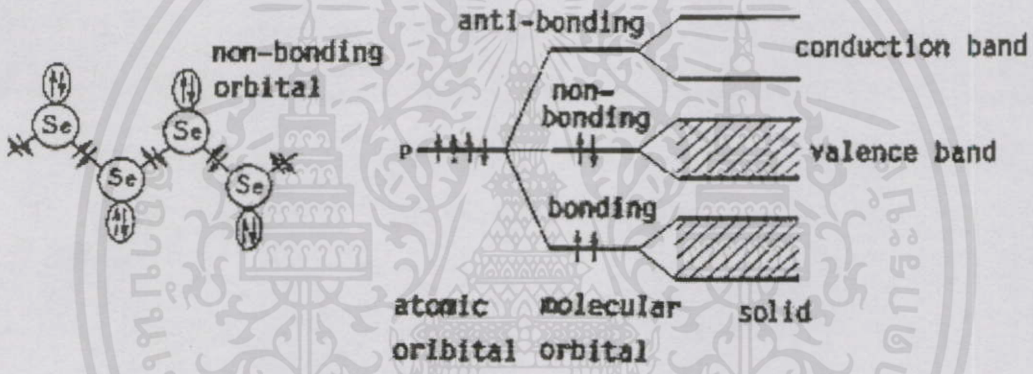
เมื่อแบ่งอะมอร์ฟัสตามสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์จะได้เป็นสองตระกูล คือ ตระกูลเตตระเฮดรัล (Tetrahedral semiconductor) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหมู่ที่ III - V เช่น Si, Ge, Ga, As และตระกูลแคลโคเกไนด์ (Calcogenide semiconductor) ซึ่งประกอบด้วยธาตุหมู่ที่ II และ VI เช่น S, Se และ Te

อะมอร์ฟัสซีลีเนียมจัดอยู่ในตระกูลแคลโคเกไนด์ เนื่องจากอยู่ในธาตุหมู่ที่ VI ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 4 ตัว ในจำนวนนี้อิเล็กตรอน 2 ตัวมีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (แขนละ 1 ตัว รวม 2 แขน) แต่อิเล็กตรอนที่เหลืออีก 2 ตัวไม่ได้มีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (Non bonding orbital) ในวัสดุตระกูลแคลโคเกไนด์มีแถบพลังงาน 3 แถบที่เกิดจาก วงโคจรชนิดบอนดิง (Bonding orbital) วงโคจรชนิดนอนบอนดิง (Non bonding orbital) และวงโคจรชนิดแอนติบอนดิง (Anti bonding orbital) ความแตกต่างของวัสดุสองตระกูลนี้ ได้แก่ การมีวงโคจรชนิดนอนบอนดิงหรือไม่ ปกติอิเล็กตรอนจะมีอยู่เต็มในวงโคจรชนิดนอนบอนดิง ดังนั้นแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันของวัสดุตระกูลแคลโคเกไนด์จึงเกิดจากวงโคจรชนิดนอนบอนดิงและวงโคจรชนิดแอนติบอนดิง วงโคจรชนิดนอนบอนดิงมีอิทธิพลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุมาก เช่น ความคล่องตัวของโฮล และความหนาแน่นของสถานะ (Density of state) รูปที่ 2.2 แสดงการสร้างพันธะของอะตอมของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส โดยรูปที่ 2.2 (ก) คืออะมอร์ฟัสตระกูลเตตระเฮดรัล และรูปที่ 2.2 (ข) คืออะมอร์ฟัสตระกูลแคลโคเกไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตระกูลเตตระเฮดรัล



(ข) ตระกูล แคลโคเกไนด์

รูปที่ 2.2 การสร้างพันธะของอะตอมของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส

2.1.1.2 แบบจำลองของแถบพลังงาน

ในกรณีของผลึกซึ่งมีการเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบในระยะยาว ทำให้ลักษณะของแถบพลังงานมีขอบของแถบคอนดักชัน (E_c) และแถบวาเลนซ์ (E_v) ชัดเจน เนื่องจากความหนาแน่นของสถานะ ที่ตำแหน่ง E_c และ E_v มีค่าลดลงกลายเป็นศูนย์ และที่ใกล้ขอบ E_c และ E_v ความหนาแน่นของสถานะมีค่าแปรผันตรงกับ $(E_v - E)^{1/2}$ และ $(E - E_c)^{1/2}$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.3 (ก)

ในกรณีสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจะมีความหนาแน่นของสถานะภายในแถบพลังงานต้องห้าม ค่อยๆลดลงจากบริเวณคล้าย band edge และลดลงเรื่อยๆสู่ใจกลางของแถบพลังงานต้องห้าม เราเรียกสถานะที่ลดลงอย่างช้าๆนี้ว่า หางของแถบพลังงาน (Band tail) เรียกสถานะที่อยู่ภายในแถบ

ต้องห้ามว่า โลคอไลซ์สเตต (Localized states) และเรียกสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์และภายในแถบคอนดักชันว่า ดีโลคอไลซ์สเตต (Delocalized states) แสดงดังรูปที่ 2.3 (ข) ที่กล่าวมานี้เป็นกรณีที่สมมติว่าไม่มีจุดบกพร่อง (Defects) อยู่ในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส แต่ในสภาพเป็นจริงในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส จะมีจุดบกพร่องที่เกิดจากแขนขาด (Dangling bonds) เป็นจำนวนมาก แขนขาดเหล่านี้จะคอยดักจับอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาใกล้ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่ำ การมีแขนขาดจะส่งผลให้เกิดโลคอไลซ์สเตตเพิ่มขึ้นภายในแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งมักจะมีจุดบกพร่องเกิดขึ้นที่ใกล้หางของแถบคอนดักชัน หรือหางของแถบวาเลนซ์ ดังรูปที่ 2 .3 (ค)

โดยทั่วไปความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์หรือแถบคอนดักชันจะมีรูปร่างเป็นพาราโบลาซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$g_v(E) \approx (E_v - E)^{1/2} \tag{2.1}$$

$$g_c(E) \approx (E - E_c)^{1/2} \tag{2.2}$$

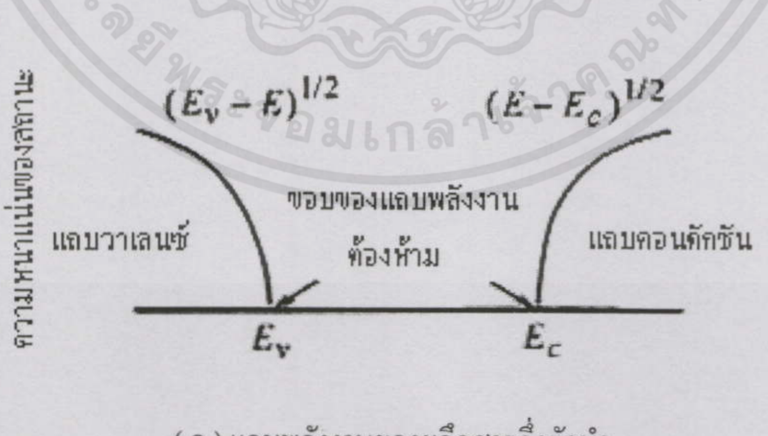
โดยที่ g_v คือ ความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์

g_c คือ ความหนาแน่นของสถานะที่อยู่ภายในแถบคอนดักชัน

E_v คือ พลังงานที่ขอบของแถบวาเลนซ์

E_c คือ พลังงานที่ขอบของแถบคอนดักชัน

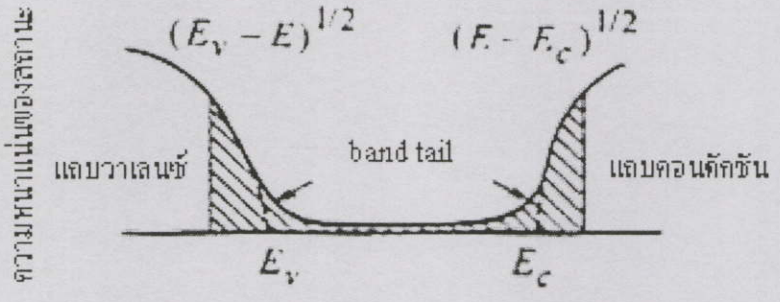
E คือ ระดับพลังงาน



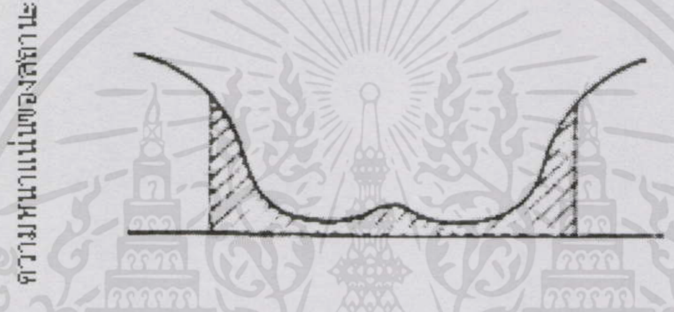
(ก) แถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบลักษณะของแถบพลังงานต้องห้าม



(ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส



(ค) ลักษณะของระดับโลคอไลซ์สเตตในแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส

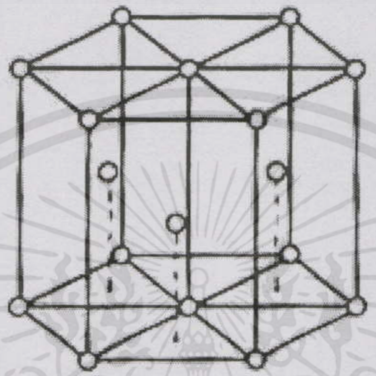
รูปที่ 2.3 (ต่อ)

2.1.2 เฮกซะโกนอลซีลีเนียม

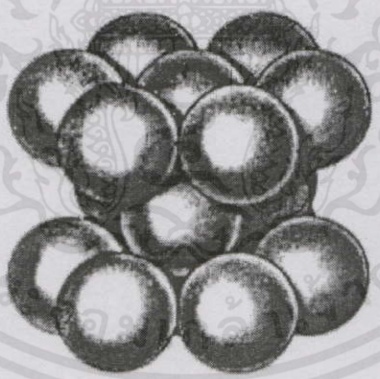
โครงสร้างผลึกมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมในแลตทิซแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal close – packed : hcp) มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม 6 หน้า แต่ละอะตอมล้อมรอบด้วยอะตอมอื่น 12 อะตอม ดังรูปที่ 2.4 ซีลีเนียมที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลหรือไตรโกนอล [2,10] ประกอบไปด้วยอะตอม 8 อะตอมเรียงตัวกันแบบ long helical chain มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนท์ แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าระยะระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดสองอะตอม มีค่า 2.373 อังสตรอม พันธะทำมุมกัน 103.1 องศา ระยะห่างระหว่างอะตอมสี่อะตอมบนสาย (Chain) ถัดมามีค่า 3.436 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่สองบนสายเดียวกันมีค่า 3.716 อังสตรอม สมบัติทางกายภาพของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม [11] มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลขอะตอม	34
- น้ำหนักอะตอม	78.96
- จุดเดือด(เคลวิน)	957.9
- จุดหลอมเหลว(เคลวิน)	490
- ชนิดของการนำไฟฟ้า	P extrinsic



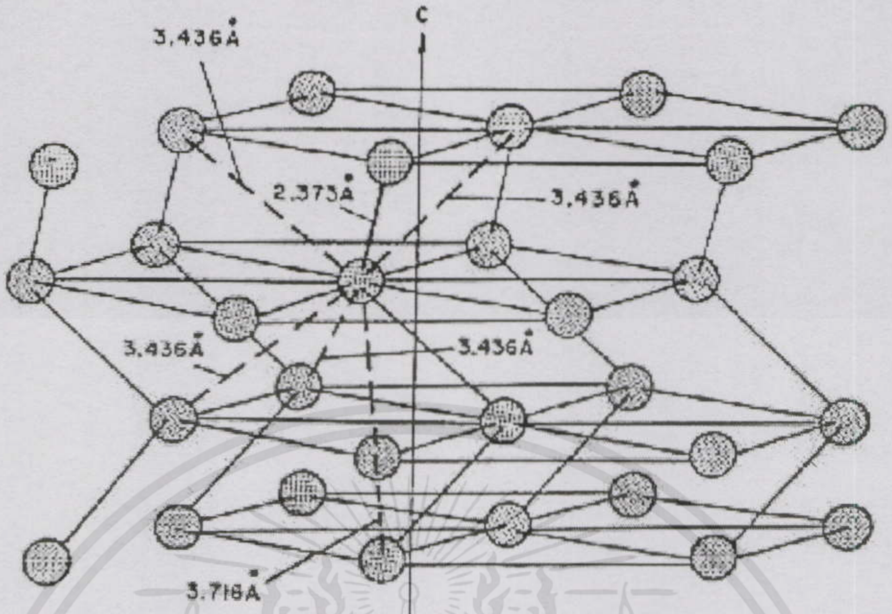
(ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล



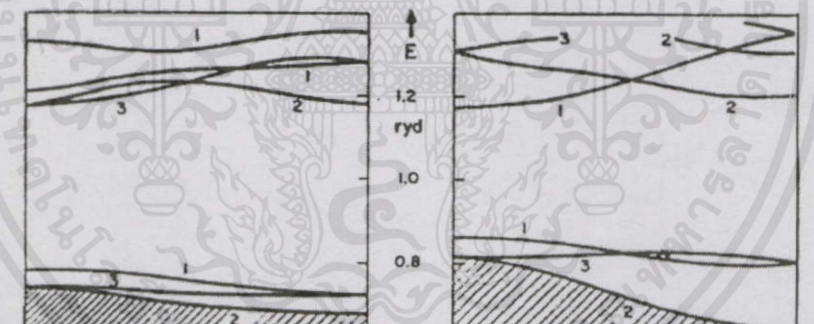
(ข) การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนอล

รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



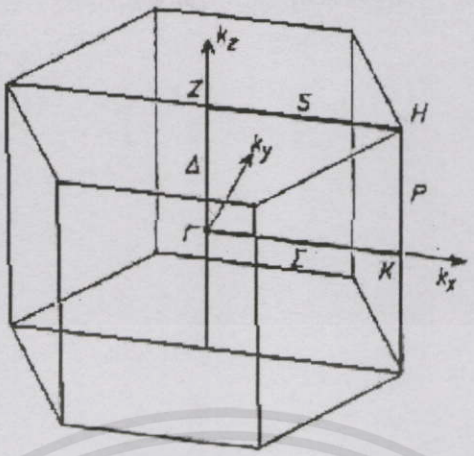
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม



(ก) โครงสร้างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน และ บริลลันโซนของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม



(ข) บริลลันโซน (Brillouin zone)

รูปที่ 2.6 (ต่อ)

จากรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานและบริลลันโซนของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม ในรูปที่ 2.6 (ก) แถบที่ถูกแรเงาคือบริเวณระหว่างแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ สามารถบอกได้ถึงแถบพลังงานต้องห้ามของสารซีลีเนียมได้โดยพิจารณาจากตำแหน่งล่างสุดของแถบคอนดักชันลบด้วยตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์ ผลต่างระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันเท่ากับ 1.79 eV [7] และพบว่า จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน อยู่บนแกนเดียวกันแสดงถึงความเป็นแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (Direct band gap)

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.5 – 2.5 อังสตรอม รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมาก วิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X–Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X–Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก หลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมา จะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 พบว่ารังสีเอ็กซ์ที่ 1 ที่มีเฟส (In phase) กับรังสีเอ็กซ์ที่ 2 แต่ความยาวของทางเดินรังสีเอ็กซ์ที่ 3 มากกว่าทางเดินของรังสีเอ็กซ์ที่ 1 ไม่เท่ากัน เป็นระยะทาง ML + LN ระยะ ML และ LN มีค่า dsinθ ดังนั้นผลต่างของทางเดินรังสีเอ็กซ์มีค่า 2dsinθ ซึ่งเป็นไปตามกฎของแบรกก์ โดย วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความยาวของทางเดินคลื่นที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$N\lambda = 2d\ \sin\theta \qquad (2.3)$$

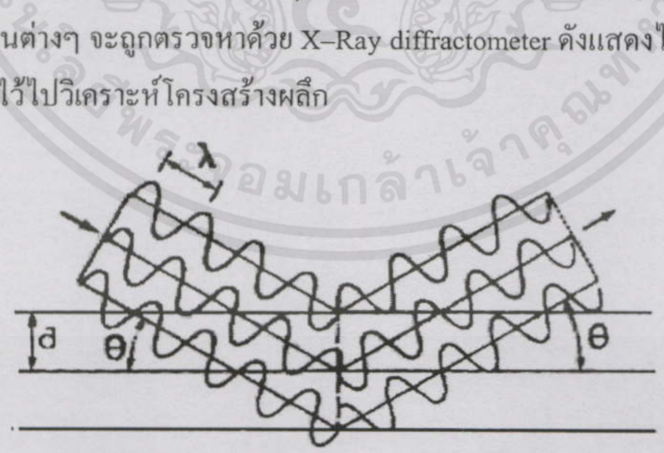
เมื่อ N คือ ลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

λ คือ ความยาวคลื่น

d คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์

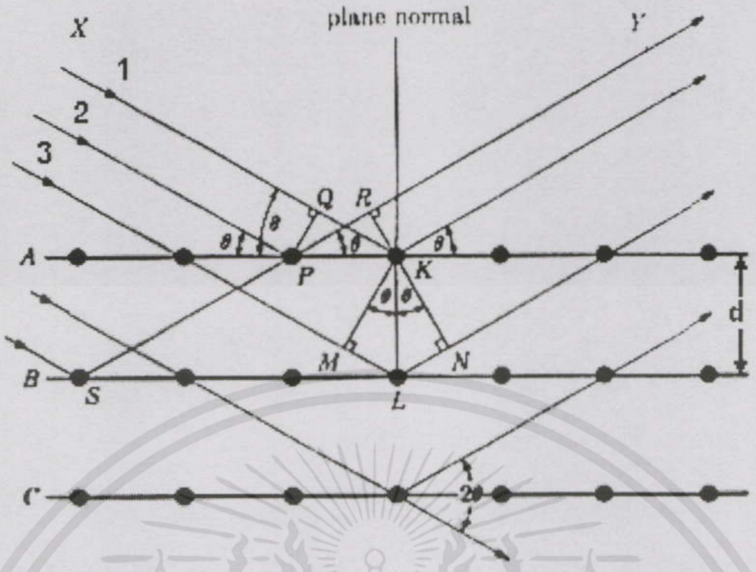
ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.7 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X–Ray diffractometer ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 และนำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



(ก) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



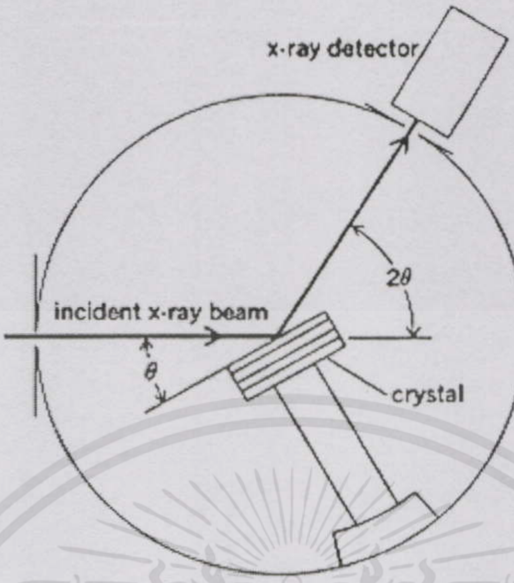
(ข) ทางเดินของรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 2.7 (ต่อ)

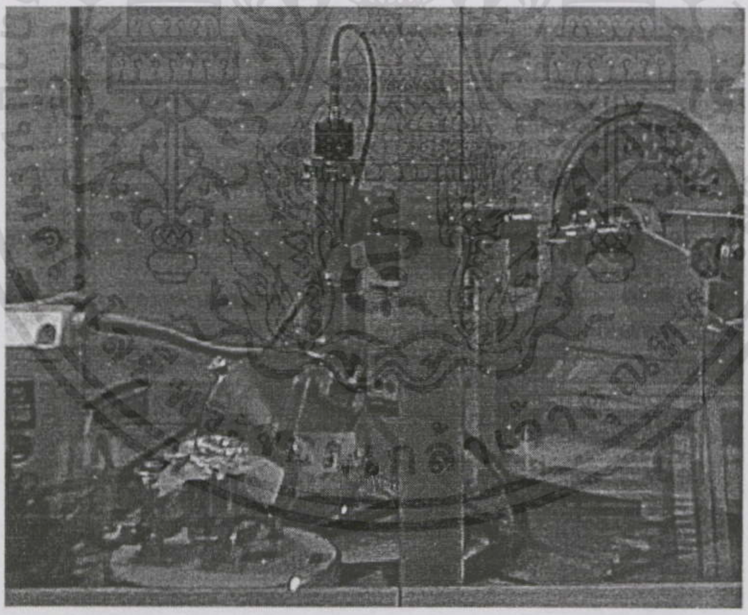
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า diffraction pattern ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ใน diffraction pattern แสดง diffraction pattern ดังรูป 2.9 และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำได้โดยการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก diffraction pattern กับบัตรข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของธาตุและสารประกอบต่างๆ ที่จัดทำโดย A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials) ซึ่งรายละเอียดที่สำคัญในบัตรข้อมูลนี้ ได้แก่

1. ชื่อธาตุหรือสารประกอบและสูตรโมเลกุล
2. ระบบผลึกและค่าคงตัวแลตทิช
3. สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี
3. d_{hkl} และ h,k,l ของระนาบที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



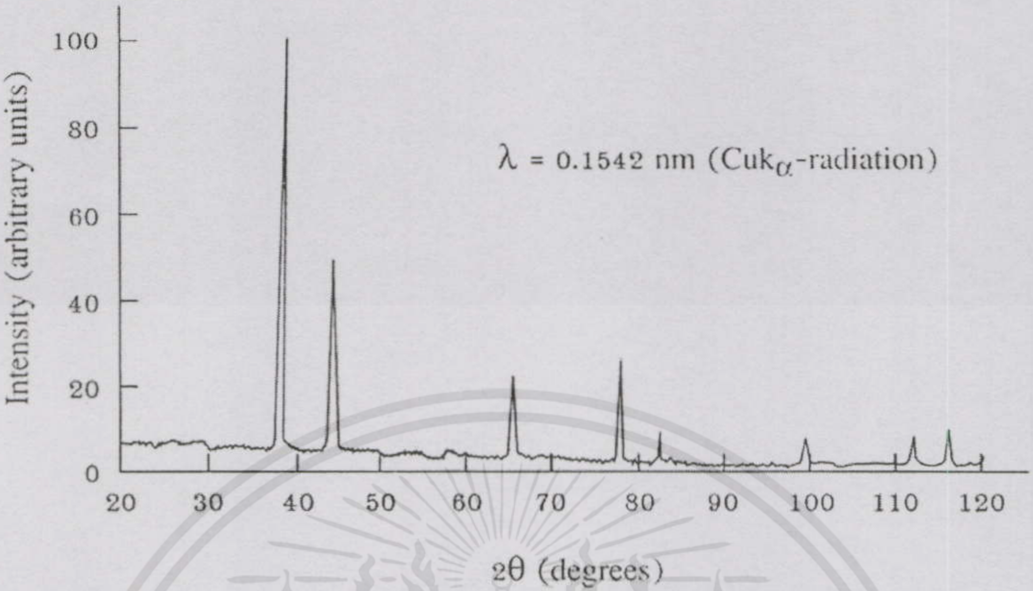
(ก) โครงสร้างของ X–Ray diffractometer



(ข) ภาพถ่ายของเครื่อง X–Ray diffractometer

รูปที่ 2.8 X–Ray diffractometer

เอกสาร...การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Diffraction pattern

2.3 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope : EM) เครื่องแรกสร้างขึ้นในปี ค.ศ.1930 โดย Manfred Von Ardenne ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบโดยทั่วไประหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope : OM) มีความคล้ายคลึงกันแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความซับซ้อนกว่ามาก และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาต้องมีการเตรียมต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ตัวอย่างต้องแห้งและนำไฟฟ้า เนื่องจากระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศและใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการกำเนิดภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่างทำให้เกิด charging effects ลำอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนไปจากบริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กรอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะกำลังเคลื่อนที่ ทำให้สามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่าง ซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นบางให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (Fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกรูปถ่ายไมโครกราฟ (Micrograph) ได้โดยตรง

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ cathode ray tube (CRT)

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

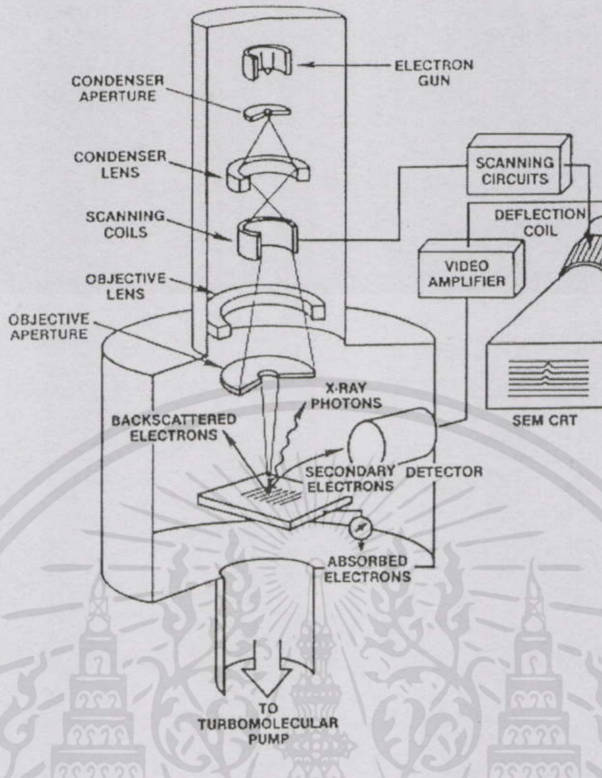
42550

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอสศักดาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

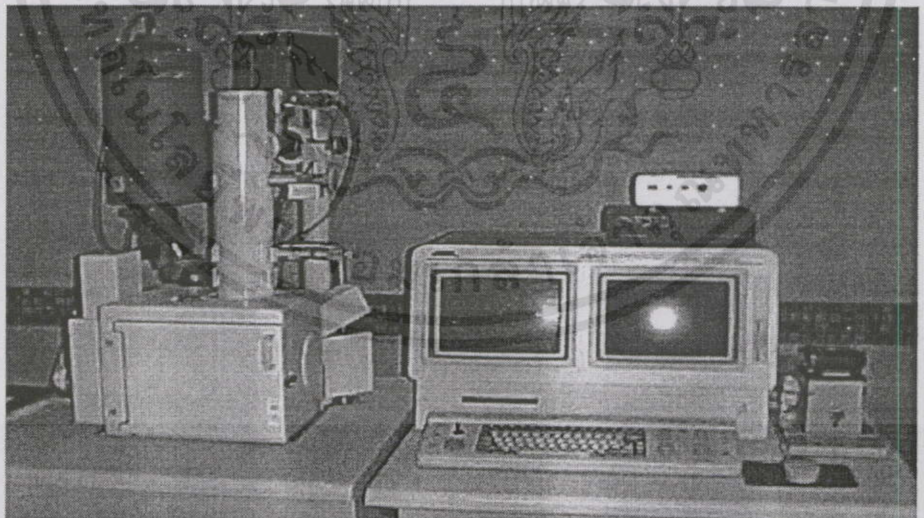
กำลังขยาย = พื้นที่บน CRT / พื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน (2.4)

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

ไม่ว่ากรณีใด ... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive Spectroscopy : EDS)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยเฉพาะการถ่ายภาพพื้นผิวแต่ในปัจจุบันมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สารตัวอย่างขึ้นอีกโดยการเพิ่มเติมอุปกรณ์บางอย่างให้แก่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดทำให้สามารถได้รับข้อมูลรายละเอียดเพิ่มขึ้น หนึ่งในเครื่องมือที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือ เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน ซึ่งทำหน้าที่วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าตัวอย่างได้

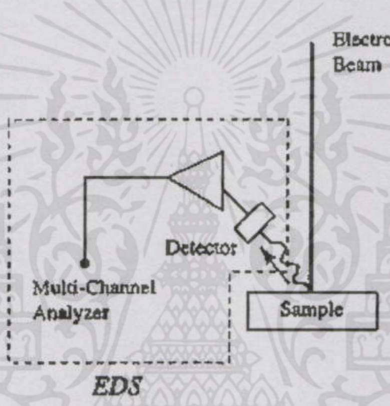
หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานจะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์ ยิงกราดลงไปบนผิวตัวอย่าง ต่างกันที่การเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาใช้งาน ความต่างของผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ โดยสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แต่สำหรับเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานจะเลือกรังสีเอ็กซ์มาใช้งาน

เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกยิงลงบนตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ รวมถึงรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray) ด้วยลักษณะการเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็จะหลุดออกจากวงโคจรทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในมีพลังงานมากกว่าจึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (X-ray) เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็จะเข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นโคจร (Electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นๆ จึงเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้ว่า รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ

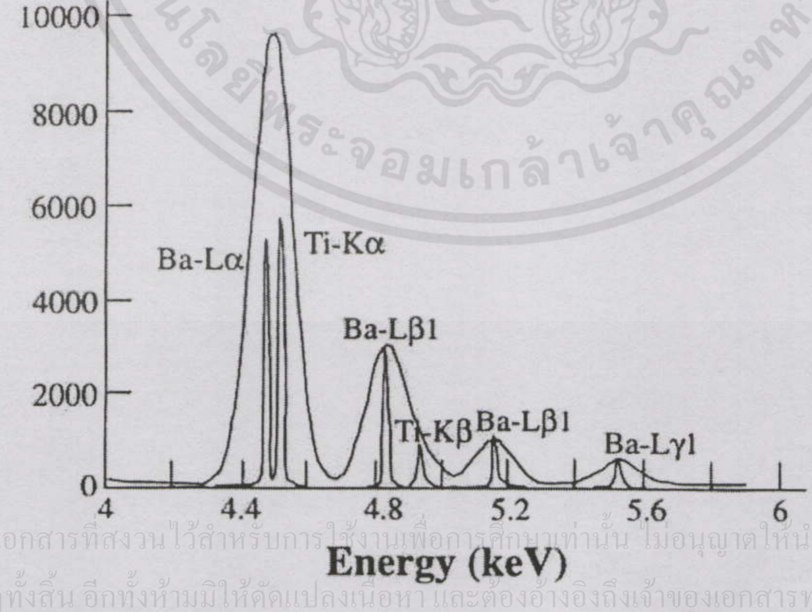
เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอ็กซ์สามารถบ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกปลดปล่อยมานี้จะถูกตรวจจับโดยซิลิกอนดีเทคเตอร์ (Silicon detector) และส่งต่อไปยังส่วนแปลงและขยายสัญญาณเป็น voltage pulse โดย charge-sensitive amplifier เมื่อสัญญาณถูกขยายแล้วสัญญาณเหล่านี้จะถูกส่งไปยัง Multichannel Analyzer (MCA) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเทียบและแบ่งแยกสัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณ จากนั้นจึงบันทึกแต่ละค่าสัญญาณลงในช่องสัญญาณ (Appropriate channel) ซึ่งมีมากถึง 1000 ช่องสัญญาณ ในแต่ละช่องสัญญาณจะแสดงถึงค่าของพลังงานของรังสีเอ็กซ์ แสดงไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานดังรูปที่ 2.12 ลักษณะของการแสดงผลการตรวจสอบจะมีลักษณะเป็นฮิสโตแกรม (Histogram) แต่เนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณนั้นมีมาก ทำให้ลักษณะของฮิสโตแกรมมีความต่อเนื่อง แสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

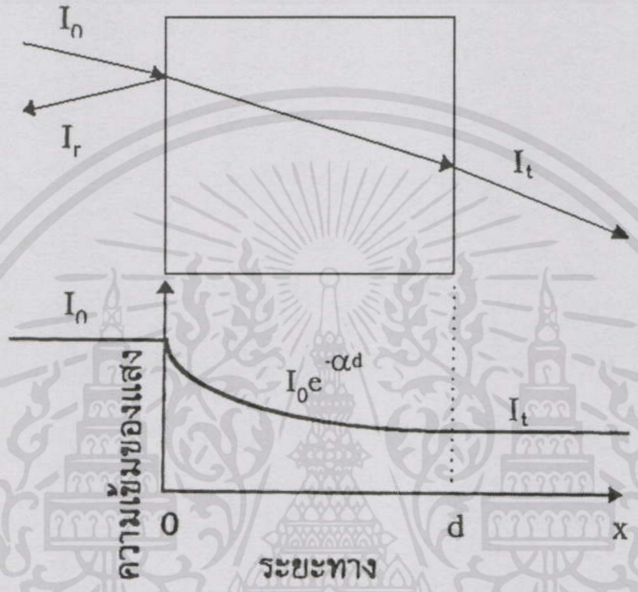


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 การแสดงผลของเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

2.4 การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

รายละเอียดของการศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงนี้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง และองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนฟิล์มบาง

เมื่อ I_o คือ ความเข้มแสงตกกระทบฟิล์มบาง

I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อน

I_t คือ ความเข้มแสงทะลุผ่าน

I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ฟิล์มบาง

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง (Reflectance)

T คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_r}{I_o} \tag{2.5}$$

$$I_r = RI_o \tag{2.6}$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_o - I_r \tag{2.7}$$

$$I_i = I_o - RI_o \tag{2.8}$$

$$I_i = (1 - R)I_o \tag{2.9}$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่ฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงทะลุผ่านมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_i \times e^{-\alpha d} \tag{2.10}$$

$$I_t = (1 - R)I_o \times e^{-\alpha d} \tag{2.11}$$

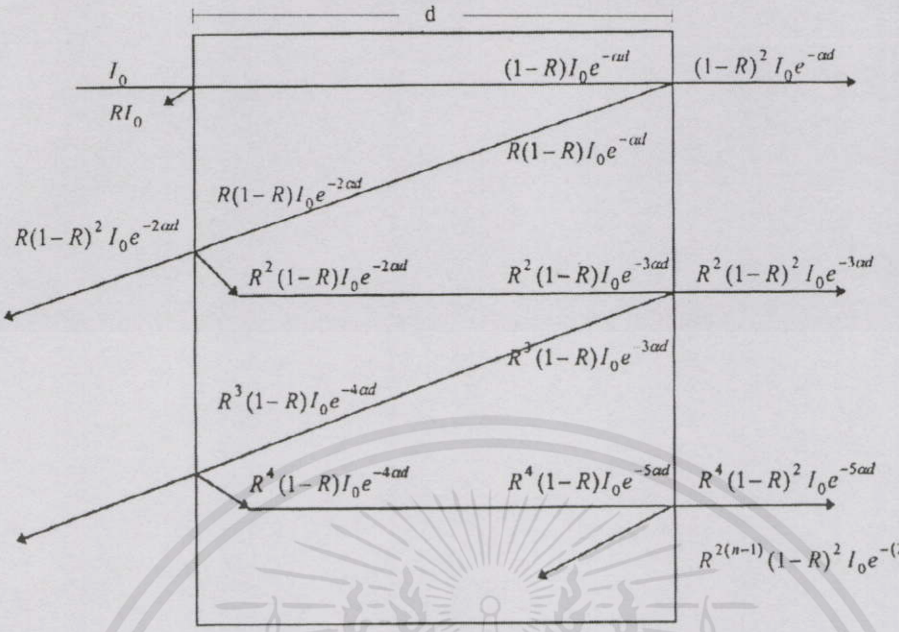
ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_o} = (1 - R)e^{-\alpha d} \tag{2.12}$$

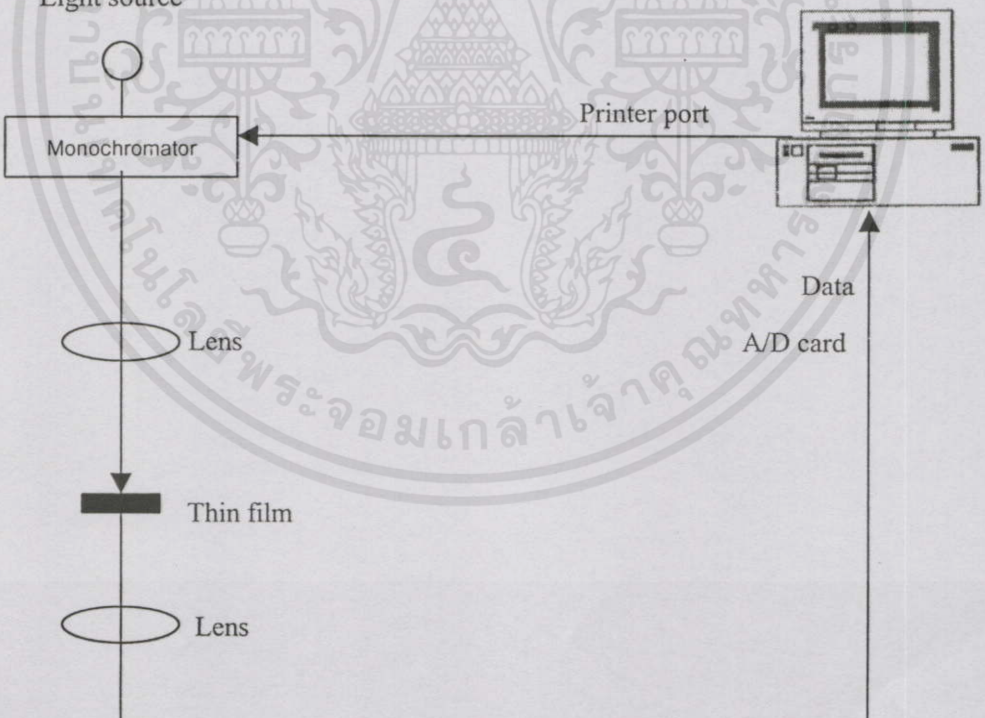
ในกรณีที่มีการสะท้อนแสงทั้งที่ผิวด้านหน้าฟิล์มบางและที่ผิวด้านหลังฟิล์มบางจำนวนครั้งเป็นอนันต์ ดังรูปที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{(1 - R)^2 + e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.15 แสดงการสะท้อนแสงทั้งที่ผิวด้านหน้าฟิล์มบางและที่ผิวด้านหลังฟิล์มบางจำนวนครั้งเป็นอนันต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.16 ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

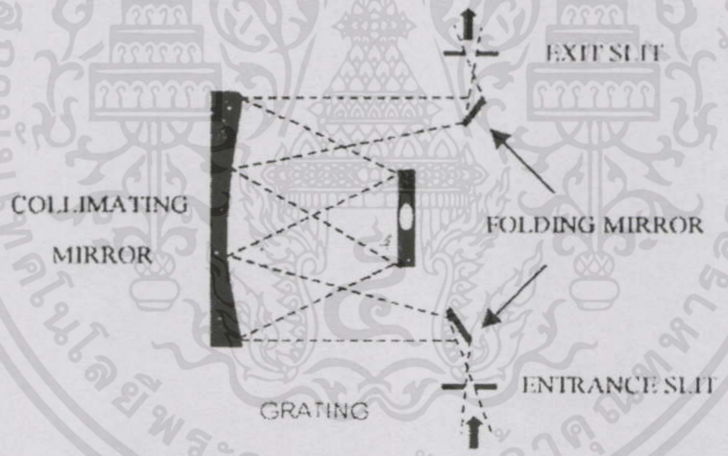
องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง โมโนโครเมเตอร์ ตัวตรวจจับสัญญาณ เลนส์ แท่นยึดสาร สเตปปิ้งมอเตอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์ แสดงไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 2.16

- แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ไส้หลอดทำจากทังสเตน (Tungsten) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ให้แสงที่ช่วงความยาวคลื่น 200-2,200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

- โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์แสดงในรูปที่ 2.17 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิท (Slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบที่คอลลิเมติง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่ความยาวคลื่นต่างๆตามการตกกระทบบนเกรตติง และแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิทต่อไป



รูปที่ 2.17 แสดงไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์

- ตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

- เลนส์ (Lens)

ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดความยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางและความเหมาะสมของระบบวัด ในงานวิจัยนี้ใช้เลนส์นูนความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร

- แท่นยึดสาร

ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับมุมของการสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น หรือทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สเตปปิงมอเตอร์ (Stepping motor)

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

0 0 1 1 0 0 1 1 (เฟส 1-2)

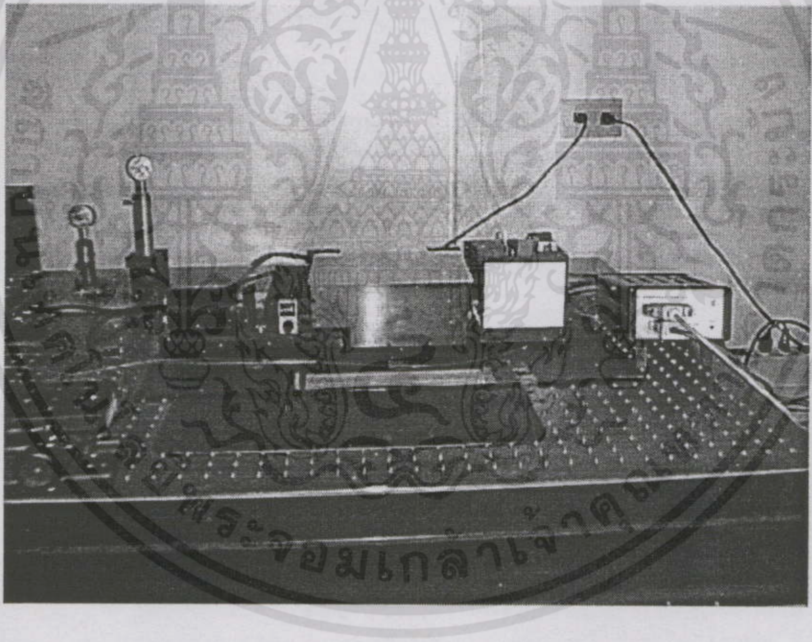
0 1 1 0 0 1 1 0 (เฟส 2-3)

1 1 0 0 1 1 0 0 (เฟส 3-4)

1 0 0 1 1 0 0 1 (เฟส 4-1)

- ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer)

ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปิงมอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลซึ่งถูกส่งผ่านทาง A/D card เพื่อทำการเก็บข้อมูล

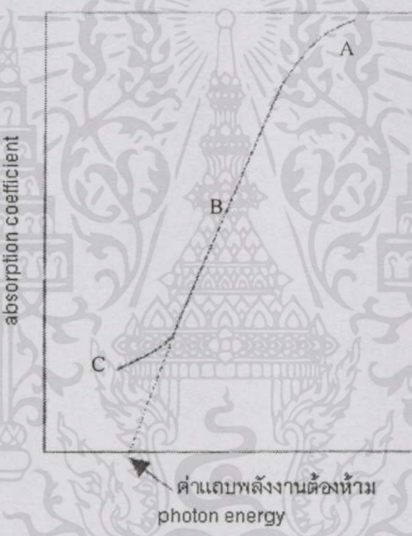


รูปที่ 2.18 แสดงไดอะแกรมระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม

การดูดกลืนแสงในผลึกสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม แล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (Absorption edge) แสดงดังรูปที่ 2.19 พลังงานโฟตอน (Photon energy) ที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับความต่างของจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ซึ่งการเขียนกราฟเช่นนี้เรียกว่า การเขียนกราฟแบบเทาซ์ (Tauc's plot) [12]

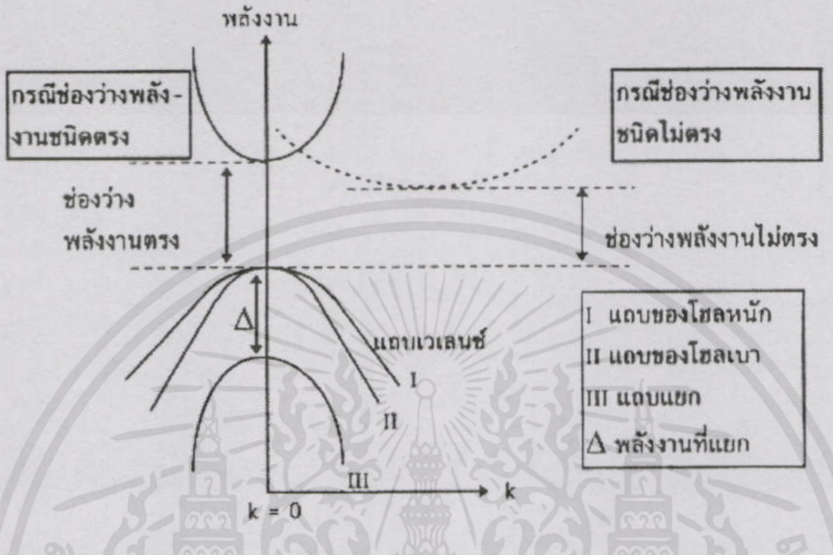


รูปที่ 2.19 แสดงขอบการดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่นของอิเล็กตรอน (Wave number) แสดงด้วยเวกเตอร์ k ในแผนภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงาน แนวแกนนอนคือเลขคลื่น k และแนวแกนตั้งคือพลังงานของอิเล็กตรอน เนื่องจากโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$ ดังนั้นแนวแกนนอนก็คือค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอน เมื่อเขียนแผนภาพของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k จะได้แผนภาพดังรูปที่ 2.20 [13] ถ้าการดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่มีค่า k เท่ากัน เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดตรง (Direct absorption) แต่ถ้าจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันมีค่า k ไม่ตรงกัน ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนเพื่อดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยโฟนอนช่วย โดยอิเล็กตรอนต้องมีการดูดความร้อนจากโครงผลึกหรือคายความร้อนให้แก่โครงผลึก เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดไม่ตรง (Indirect absorption)



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นย่านสำคัญได้ 3 ย่านคือ

1. บริเวณการดูดกลืนแสงมากในย่าน A (High absorption region) ($10^3<\alpha<10^5$ cm^{-1}) การดูดกลืนแสงในย่านนี้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สู่แถบคอนดักชัน

2. บริเวณเอกซ์โปเนนเชียล B (Exponential part) ($10^0<\alpha<10^3$ cm^{-1}) กราฟในบริเวณนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง นิยมเรียกกราฟแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลนี้ว่า หางของเออร์แบก (Urbach's tail) หางของเออร์แบกในกรณีของผลึกเกิดจากการสั่นเชิงจลน์ของโครงผลึก (Kinetic fluctuation) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสนอกจากเกิดจากการสั่นเชิงจลน์แล้วยังเกิดจากการสั่นเชิงสถิต (Static fluctuation) ด้วยเนื่องจากสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ

3. บริเวณการดูดกลืนแสงน้อย C (Weak absorption tail) ($\alpha<10^0$ cm^{-1}) ที่พลังงานต่ำกว่าหางของเออร์แบกมีการดูดกลืนแสงน้อย การดูดกลืนแสงในย่านนี้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอไลซ์สเตต และระดับดีโลคอไลซ์สเตต

การหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (T) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_o) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลง

แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง ดังสมการที่ 2.12 โดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากดังนั้นสมการ 2.13 จะกลายเป็น

$$T = e^{-\alpha d} \tag{2.14}$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d}\ln T \tag{2.15}$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

T คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

I_o คือ ความเข้มแสงตกกระทบฟิล์มบาง

I_t คือ ความเข้มแสงทะลุผ่าน

d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในฟิล์มบาง

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงจากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงกับค่าพลังงานแถบต้องห้ามซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา แถบพลังงานต้องห้าม ของฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ของแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่า

$$\alpha h\nu \sim \left(h\nu - E_g\right)^{\gamma} \tag{2.16}$$

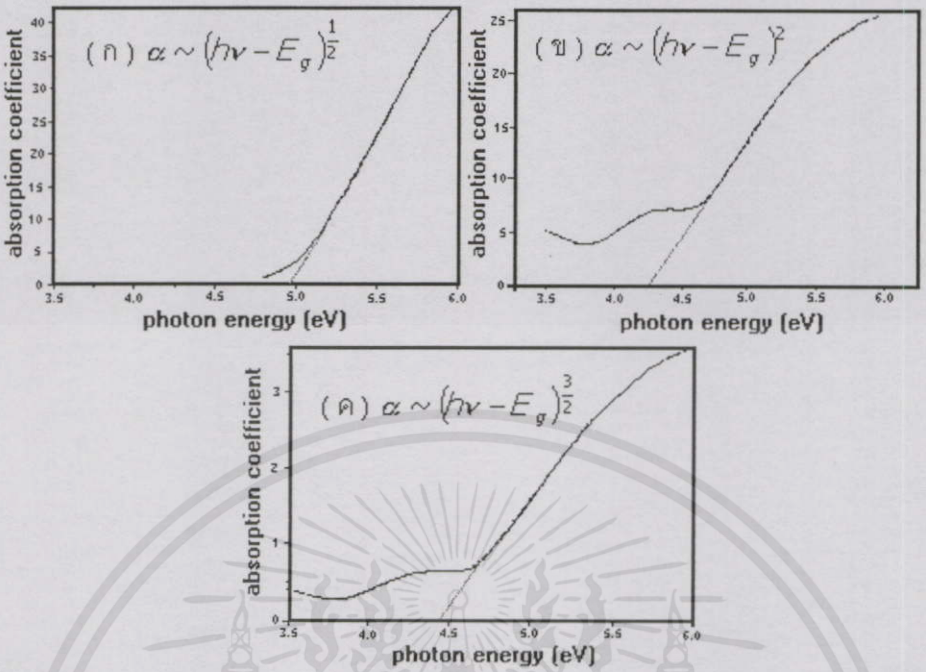
เมื่อ $\gamma = \frac{1}{2}$ สำหรับแถบยินยอมที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct allowed transition)

$= \frac{3}{2}$ สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct forbidden transition)

$= 2$ สำหรับแถบยินยอมที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect allowed transition)

$= 3$ สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect forbidden transition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แจ้งว่าเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงกราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง

กล่าวคือสามารถคำนวณหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมซึ่งมีแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง ($\gamma = \frac{3}{2}$) [10] ได้จากการเขียนกราฟแบบเทาซ์ และคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง และพลังงานโฟตอน โดยการแทนค่า γ และสมการที่ 2.15 ลงในสมการที่ 2.16 ได้ดังนี้

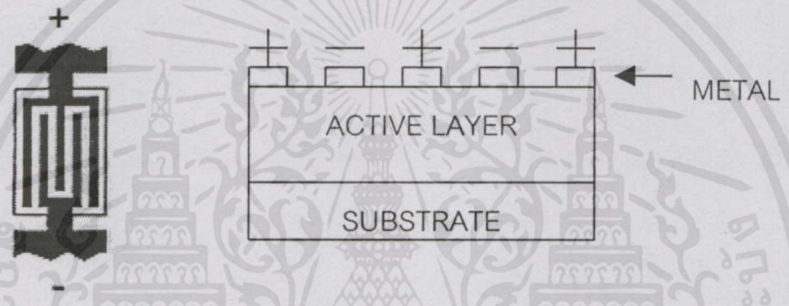
$$(\alpha h\nu)^{\frac{2}{3}} = \left[\left(-\frac{1}{d}\ln T\right)h\nu\right]^{\frac{2}{3}} = h\nu - E_g \qquad (2.17)$$

2.6 ทฤษฎีการประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

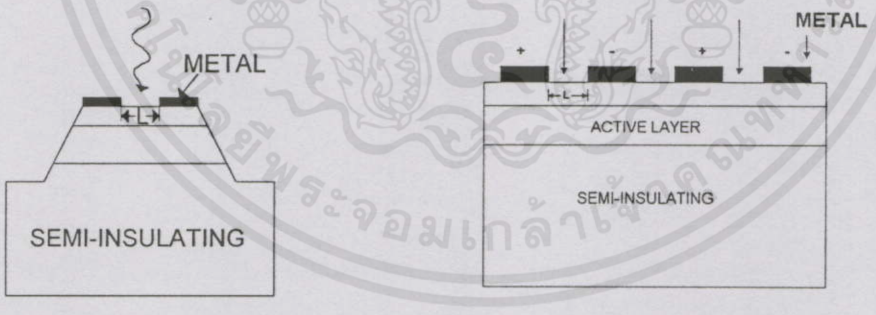
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เริ่มมีประดิษฐ์ขึ้นในปี 1979 โดยอาศัยแนวคิดของ two schottky barrier และการเพิ่มชั้น barrier-enhancement เพื่อลดค่าของกระแสมืด (Dark current) สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างลักษณะนี้ ได้รับความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้การทำโฟโตดีเทกเตอร์ (Photodetector) ในงานสื่อสารทางแสงที่ต้องการความเร็วสูง

โครงสร้างทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แสดงในรูปที่ 2.22 ประกอบด้วยชั้นที่ใช้เป็น schottky barrier ทำให้โครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ back-to-back พื้นที่รับแสงจะอยู่ระหว่างช่องว่างของขั้วโลหะ การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำโครงสร้าง

โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มักจะกระทำบนแผ่นรองรับที่เป็นสารกึ่งฉนวน (Semi-insulating substrate) บนแผ่นรองรับเป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นแอกทีฟ (Active Layer) ซึ่งได้จากการปลูกด้วยวิธีต่างๆ เช่น MBE OMVPE E-beam evaporator และ thermal evaporator เป็นต้น โดยที่ความหนาของชั้นแอกทีฟ ควรจะมีค่ามากกว่าค่าความยาวของการดูดกลืน (Absorption length) การเพิ่มชั้นของสารที่มีค่าแถบพลังงานมากกว่าของชั้นแอกทีฟจะช่วยยกระดับความสูงของกำแพงศักย์ ความกว้างของขั้วโลหะจะต้องให้เล็กที่สุดเพื่อเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงการสร้างขั้วโลหะมักจะใช้วิธีการ optical lithography ซึ่งสามารถทำขั้วให้มีขนาดเล็กได้ถึง 0.5 ไมครอน รูปร่างของขั้วโลหะโดยส่วนใหญ่มี 2 รูปแบบ คือ แบบ mesa และแบบ interdigitated strips แสดงดังรูปที่ 2.23 (ก) และ 2.23 (ข) ตามลำดับ



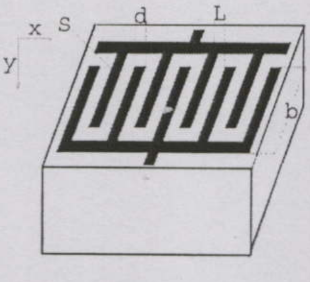
รูปที่ 2.22 โครงสร้างทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ



(ก) ขั้วโลหะแบบ Mesa (ข) ขั้วโลหะแบบ Interdigitated strips

รูปที่ 2.23 ลักษณะขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

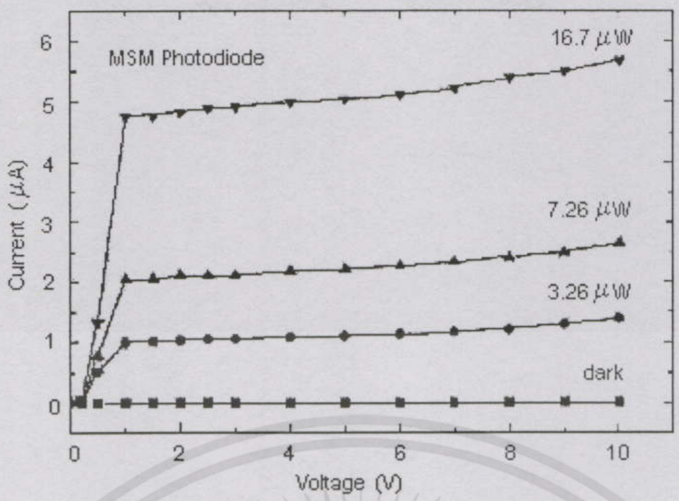


(ค) ภาพด้านบน ของแบบ Interdigitated strips

รูปที่ 2.23 (ต่อ)

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะนี้กำแพงศักย์แบบชอตต์กี (Schottky barrier) ประกบแบบ back-to-back เมื่อทำการไบแอสไม่ว่าจะกรณีไบแอสตรงหรือไบแอสแบบย้อนกลับ จะมีผลทำให้กำแพงชอตต์กีด้านหนึ่งมีทิศทางไปข้างหน้า (Forward direction) และอีกด้านหนึ่งมีทิศทางย้อนกลับ (Reverse direction)

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าดีเทคเตอร์แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะพิจารณาทั้งในส่วนของกระแสมืด (Dark current) และในส่วนของกระแสโฟโต (Photo current) พิจารณาในส่วนของกระแสมืดจะขึ้นอยู่กับกลไก 2 อย่าง อย่างแรกคือการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบสุ่ม (Spontaneous electron-hole pairs) ภายในบริเวณแอกทีฟ (Active region) เนื่องจากพลังงานความร้อน (Thermal energy) พบว่าค่าของกระแสมืดจะขึ้นกับแรงดันไบแอส และการทะลุผ่าน (Tunneling) ที่กำแพงศักย์ ดังนั้นการลดค่าของกระแสมืด ทำได้โดยการไบแอสที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ และการปรับเปลี่ยนระดับความสูงของกำแพงศักย์ อีกอย่างหนึ่งเกิดจากพาหะที่สามารถข้ามกำแพงชอตต์กีได้ เมื่อพิจารณาค่าของกระแสโฟโต (Photo current) พบว่ามีค่าขึ้นกับแรงดันไบแอส และกำลังของแสงตกกระทบที่ความเข้มแสงคงที่ พบว่ากระแสโฟโตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามแรงดันไบแอสจนกระทั่งอิ่มตัวที่แรงดันไบแอสค่าหนึ่งซึ่งมีค่าต่ำ การเพิ่มขึ้นของกระแสโฟโตนี้เกิดจากการขยายตัวของชั้นปลอดพาหะ (Depletion region) ซึ่งมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) ของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนั้นสารกึ่งตัวนำโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ นี้จะมีค่าความเก็บประจุที่ต่ำมาก มีผลทำให้ค่า RC time constant ในการอัดประจุไม่มีผลต่อความเร็วของพาหะ แต่ค่าความเร็วดังกล่าวขึ้นกับค่าเวลาการเคลื่อนย้าย (Transit time) ของพาหะ ซึ่งค่าเวลาดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับขนาดของช่องว่างระหว่างขั้วโลหะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยเทคนิคระเหยสารในระบบสุญญากาศ

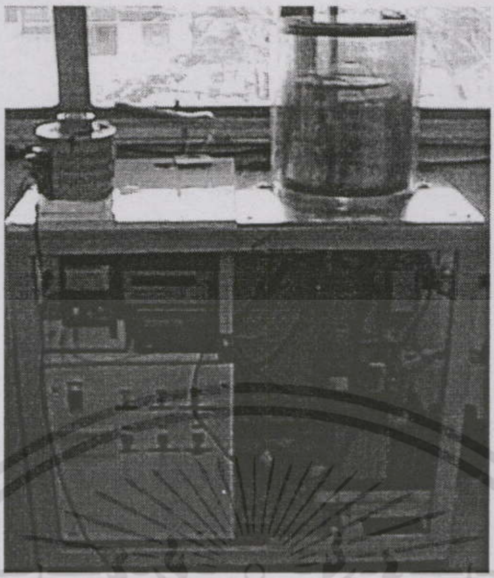
ปัจจุบันเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางมีบทบาทอย่างมากในงานอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ และได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางขึ้นมามากมาย เช่น CVD MBE OMVPE และ RF Sputtering เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารจากแหล่งเดียวด้วยความร้อนในสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางโดยการให้ความร้อนเพื่อระเหยสารให้ขึ้นไปเกาะเป็นฟิล์มบางติดบนแผ่นรองรับ (Substrate)

การเตรียมสารกึ่งตัวนำแบบฟิล์มบาง เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมทำกันมากในงานวิจัยเพราะสามารถนำไปทำในขั้นอุตสาหกรรมได้ เพราะสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงอย่างมากเนื่องจากใช้เวลาในการเตรียมน้อย และทำการเตรียมได้ครั้งละมากๆ การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารนั้นทำได้หลายแบบเช่น การเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเป็นไออย่างรวดเร็ว (Flash evaporation) และการเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal evaporation) ซึ่งมีวิธีการแยกย่อยไปอีกเช่น การเตรียมโดยระเหยสารจากแหล่งเดียว (Single source evaporation) และการเตรียมโดยระเหยสารจากหลายแหล่ง (Multiple source evaporation) โดยเฉพาะวิธีการสุดท้ายนี้เหมาะสมในการใช้เตรียมฟิล์มบางมาก เพราะถ้าแต่ละแหล่งที่ระเหยสารมีการควบคุมอัตราการระเหยตามที่ต้องการแล้ว สามารถที่จะกำหนดปริมาณของสารแต่ละชนิดที่ขึ้นไปเกาะบนแผ่นรองรับเป็นสารประกอบฟิล์มบางได้

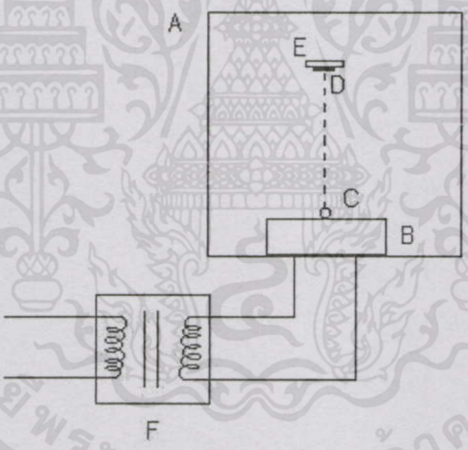
หลักการในการทำงานของระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศเริ่มจากการดูดอากาศภายในครอบแก้วสุญญากาศ โดยปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump) ทำหน้าที่ลดความดันภายในครอบแก้วปั๊มกลโรตารี (Rotary pump) จะดึงอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย ซึ่งสามารถทำให้ความดันภายในระบบลดลงต่ำสุดถึง 10^{-5} มิลลิบาร์ จากนั้นให้ความร้อนแก่สารซีลีเนียมบริสุทธิ์ (99.999%) ซึ่งวางอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crucible) โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่เบ้าหลอมสาร ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโดยวาริแอค (Variac) ไอระเหยของสารซีลีเนียมจะขึ้นไปเกาะติดแผ่นรองรับเป็นฟิล์มบางซีลีเนียม

ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนา 650 นาโนเมตร ขนาด 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น แสดงระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในครอบแก้ว ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

เอกสาร ... การค้า
ไม่ว่ากรณี ... เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในครอบแก้ว

เมื่อ A คือ ครอบแก้วสุญญากาศ

B คือ เบ้าหลอมสาร

C คือ สารที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง

D คือ ฟิล์มบาง

E คือ แผ่นรองรับ

F คือ หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศประกอบด้วย ครอบแก้วสุญญากาศ (Chamber) เบ้าหลอมสาร (Crucible) แผ่นรองรับ (Substrate) ชัตเตอร์ (Shutter) หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง วาริแอค (Variac) เกจพิรานี (Pirani guage) ปั๊มกลโรตารี (Rotary pump) ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Diffusion pump) และเครื่องทำความเย็น (Refrigerator) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ครอบแก้วสุญญากาศ

ทำจากแก้ว pyrex ทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารด้วยความร้อน

- เบ้าหลอมสาร

ทำจากโมลิบดีนัม (Molybdenum) ทำหน้าที่ใส่สารซีลีเนียม

- แผ่นรองรับ

แผ่นรองรับเป็นแผ่นแก้ว ทำหน้าที่รองรับไอของสารซีลีเนียมที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง

- ชัตเตอร์

ทำหน้าที่ปิดกั้นไอระเหยของสารซีลีเนียม

- หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง

ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอมสาร เพื่อใช้ในการระเหยสาร ซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำ แต่เอาท์พุทที่เป็นกระแสมีค่าสูง

- วาริแอค

ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง

- เกจพิรานี

ทำหน้าที่วัดความดันภายในระบบสุญญากาศ

- ปั๊มกลโรตารี

ทำหน้าที่ในการลดความดันภายในระบบขั้นต้น สามารถลดความดันได้ต่ำสุด $\sim 10^{-2}$ มิลลิบาร์ หลักการคือก๊าซหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวของลูกสูบ ทำให้ก๊าซในห้องสูบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกก๊าซจึงถูกขับออกมา

- ปั๊มไอฟุ้งกระจาย

ทำหน้าที่ลดความดันภายในครอบแก้ว หลักการคือน้ำมันจะถูกเผาให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าจนเดือด น้ำมันจะระเหยกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามท่อกลวง ไอน้ำมันจะถูกระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น เมื่อไอน้ำมันสูญเสียพลังงานความร้อนทำให้พลังงานจลน์ลดลง และตกลงมาปะทะกับโมเลกุลของก๊าซที่บริเวณตอนบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง

โมเลกุลของก๊าซที่มารวมตัวอยู่ด้านล่างจะทำให้ความดันของก๊าซส่วนล่างมากกว่าส่วนบน จากนั้นปั๊มกลโรตารีจะดึงออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย ซึ่งสามารถทำให้ความดันลดลงต่ำสุดถึง 10^{-5} มิลลิบาร์

- เครื่องทำความเย็น

ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย เพื่อระบายความร้อนให้กับไอน้ำมัน

3.2 ขั้นตอนการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม

การแอนนีล [14] เป็นกระบวนการให้ความร้อนกับวัสดุสารเพื่อจุดประสงค์ในการลดความเค้นหลังจากที่วัสดุผ่านการทำงานในภาวะที่มีอุณหภูมิเย็นหรือร้อน เพื่อปรับปรุงให้วัสดุสารเกิดความผิดเพี้ยนจากดิสโลเคชัน (Dislocation) หรือความบกพร่องแบบจุดลดลง และเพื่อปรับปรุงสมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติเชิงกล เป็นต้น โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วย 3 สภาวะ คือ recovery state, recrystallization state และ grain growth

- recovery state เป็นภาวะที่วัสดุสารที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงกลน้อย (ความแข็งและความแข็งแรง) แต่เป็นสภาวะลดความเข้มข้นของข้อบกพร่องแบบจุดภายในเกรน เป็นสภาวะที่ยอมให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ไปยังจุดที่พลังงานต่ำกว่า และชดเชยการลดลงเหล่านี้ด้วยการฟอร์มตัวของ subgrains ซึ่งเป็นเกรนที่มีขอบเขตมุมค่าน้อยๆ (ประมาณ 2-3 องศา ของมุมที่มีการจัดเรียงตัวผิดไป)

- recrystallization state เกิดขึ้นเมื่อ recovery state สิ้นสุดลง มีการจัดตัวของนิวคลีไอด์ (Nuclei) ของเกรนใหม่เริ่มขึ้นที่ขอบเกรนเดิม เป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นถึงการเริ่มต้นของสภาวะการเกิดผลึกใหม่โดยขนาดเกรนของผลึกที่จัดเรียงตัวใหม่จะขึ้นอยู่กับจำนวนเกรนที่ผิดเพี้ยนไป อุณหภูมิการแอนนีล เวลาในการแอนนีล และส่วนประกอบภายในเนื้อสารเอง โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ทำให้ความคล่องตัวของอะตอมเพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลได้ จะมีค่าประมาณหนึ่งในสามถึงครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลวสัมบูรณ์ (Absolute melting point) โครงสร้างในระดับจุลภาคของสภาวะนี้ในช่วงแรกเกรนที่ไม่มีความเค้นจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของเกรนเดิม และจะโตขึ้นจนระบบเสถียรความเข้มข้นของเกรนใหม่จะเพิ่มขึ้น

- grain growth เริ่มขึ้นเมื่อการจัดเรียงผลึกขั้นต้นสมบูรณ์ พลังงานที่รอยต่อระหว่างเกรนจะน้อยที่สุด ทำให้เป็นสภาวะที่ระบบมีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งสภาวะนี้ดูคล้ายกับว่าเป็นสภาวะที่พยายามลดพื้นที่ผิวของเกรนรวมลงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแอนนีลในงานวิจัยนี้ เป็นการให้ความร้อนแก่ฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 - 363 K เป็นเวลา 5 นาที องค์ประกอบของระบบการแอนนีลแสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย แผ่นกำเนิดความร้อน แท่นวางฟิล์มบาง (Thin film holder) แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Thermal controller) ตามลำดับ

- แผ่นกำเนิดความร้อน

ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ฟิล์มบางซีลีเนียมโดยรับกระแสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า

- แท่นวางฟิล์มบาง

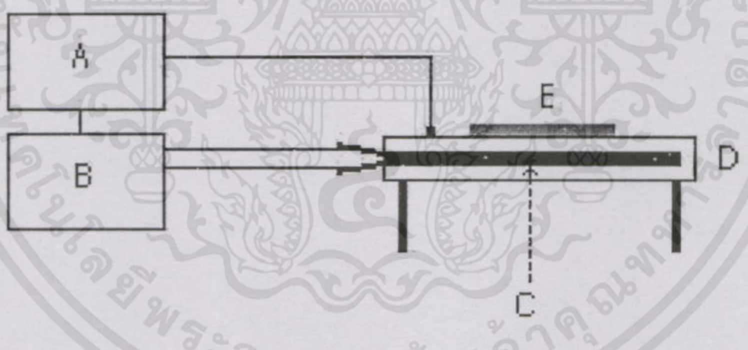
ทำหน้าที่รองรับและส่งผ่านความร้อนจากแผ่นกำเนิดความร้อนให้แก่ฟิล์มบางซีลีเนียม

- แหล่งจ่ายไฟฟ้า

ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้แก่แผ่นกำเนิดความร้อนที่อยู่ภายในแท่นวางฟิล์มบาง

- ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิในการแอนนีล โดยวงจรจะทำหน้าที่ตัดกระแสที่ส่งมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ต้องการและจะยอมให้กระแสผ่านเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของระบบการแอนนีล

เมื่อ A คือ ชุดควบคุมอุณหภูมิ

B คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า

C คือ แผ่นกำเนิดความร้อน

D คือ แท่นวางฟิล์มบาง

E คือ ฟิล์มบางซีลีเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

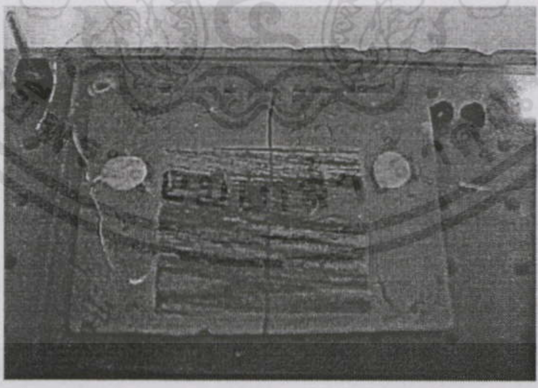
3.3 ขั้นตอนในการเตรียมและตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมมาประยุกต์ใช้ในลักษณะของโฟโตเซล (Photocell) โดยเริ่มจากนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่เตรียมได้มาประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จากนั้นตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเมื่อความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนไป

3.3.1 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

การทำขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะในงานวิจัยนี้ใช้สารทองคำ (Gold) เป็นวัสดุในการเตรียมขั้วโลหะ การเตรียมขั้วโลหะนี้เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศระบบเดียวกันกับระบบในการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียม เบ้าหลอมสารที่ใช้ในการระเหยสารทองคำทำจากทังสเตน (Tungsten)

ขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เตรียมโดยการระเหยสารทองคำ ลงบนฟิล์มบางซีลีเนียมที่แอนนีลด้วยอุณหภูมิ 300 K 333K และ 363 K มีความหนาของขั้วโลหะประมาณ 100 นาโนเมตร ขนาด 1.5 x 3 ตารางเซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.2 มิลลิเมตร แสดงภาพตัวอย่างของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ขั้นตอนในการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เริ่มจากต่อขั้วไฟฟ้ากับขั้วโลหะของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นให้ความเข้มแสงแก่สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ระยะ 5 - 100 เซนติเมตรพร้อมทั้งวัดค่าความต้านทานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ นำค่าที่วัดได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปตรวจสอบสมบัติเฉพาะด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด การตรวจสอบการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้าม โดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง และการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ตรวจสอบโดยการวัดค่าความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบ ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดลองการแอนนีลฟิล์มบางซีลีเนียม

ในงานวิจัยส่วนนี้แบ่งเป็นสองขั้นตอนคือขั้นแรกเป็นการเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ ขั้นที่สองคือการนำฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ไปแอนนีลเป็นฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1.1 การเตรียมฟิล์มบางซีลีเนียม

ฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นสีแดง ความหนา 650 นาโนเมตร ขนาด 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางซีลีเนียม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

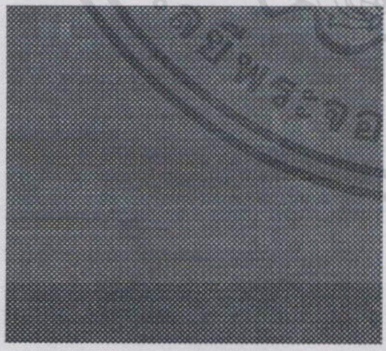
เมื่อนำฟิล์มบางซีลีเนียมที่เตรียมได้ไปแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 - 363 K เป็นเวลา 5 นาที ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่แอนนีลด้วยอุณหภูมิต่างกัน จะมีลักษณะของสีต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.2

(ก) อุณหภูมิ 300 K

(ข) อุณหภูมิ 323 K

(ค) อุณหภูมิ 333 K

(ง) อุณหภูมิ 343 K



(จ) อุณหภูมิ 353 K

(ฉ) อุณหภูมิ 363 K

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

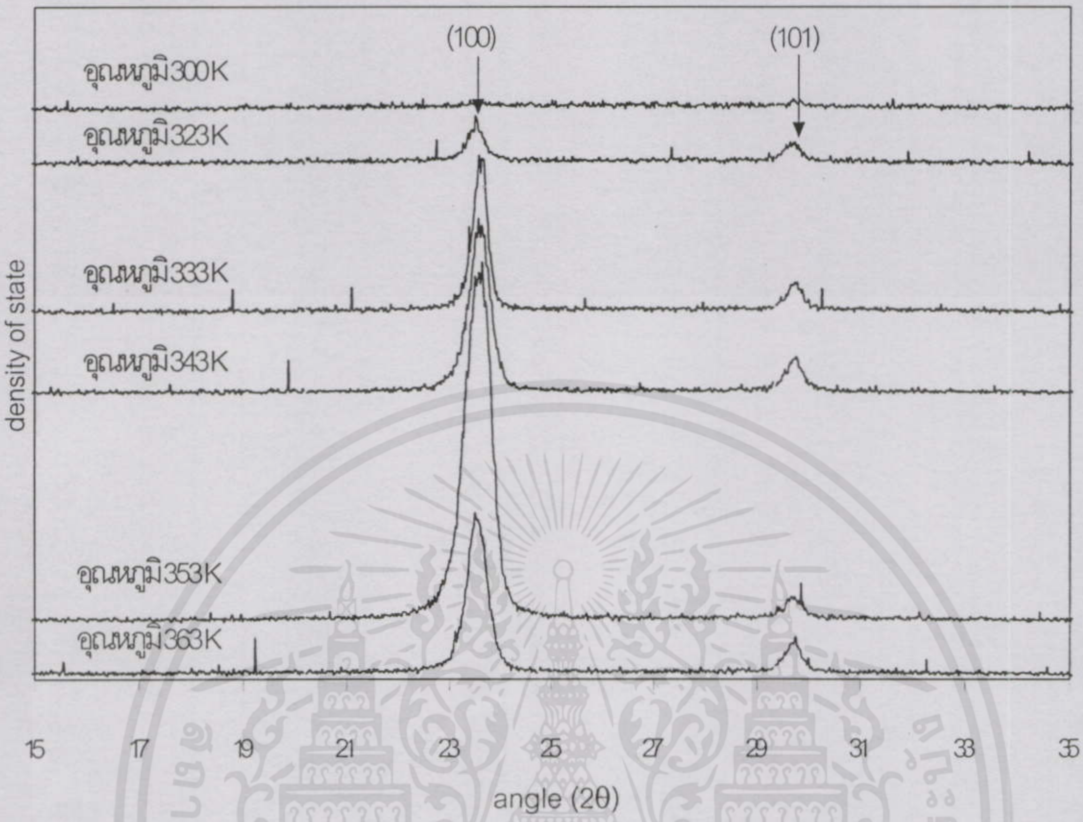
จากการเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมพบว่าฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมมีลักษณะของสีเปลี่ยนไป งานวิจัยในขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบโครงสร้างผลึก เพื่อระบุชนิดของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม เนื่องจากการทราบชัดเจนถึงชนิดของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมจะส่งผลให้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่เตรียมได้ถูกต้อง วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และการถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า diffraction pattern ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำได้โดยการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก diffraction pattern กับบัตรข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของธาตุและสารประกอบต่างๆที่จัดทำโดย A.S.T.M.

เมื่อนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมไปตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 K มีสมบัติเป็นอะมอร์ฟัสซีลีเนียม ส่วนฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 323 – 363 K เกิด peak ของระนาบ {100} ที่มุม 23.52 องศา และระนาบ {101} ที่มุม 29.73 องศา ซึ่งเป็นสมบัติของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม [15] ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



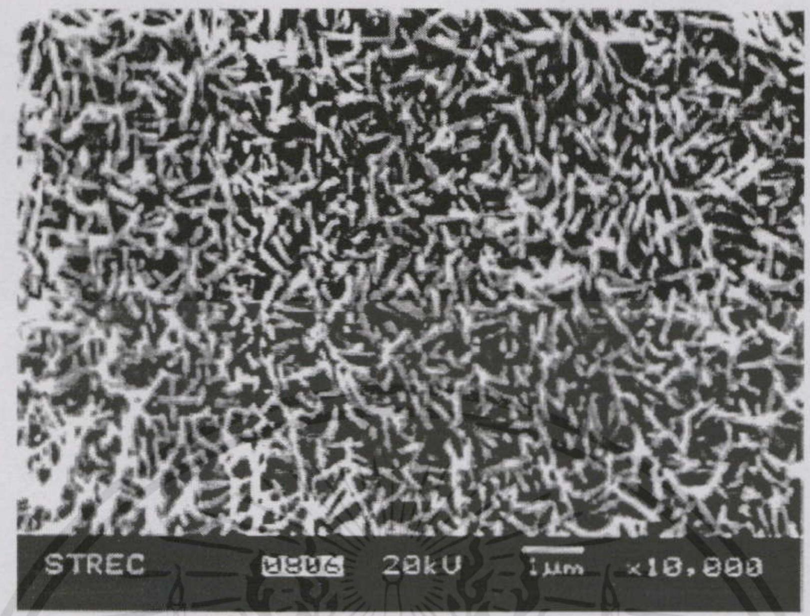
รูปที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

4.2.2 การตรวจสอบฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

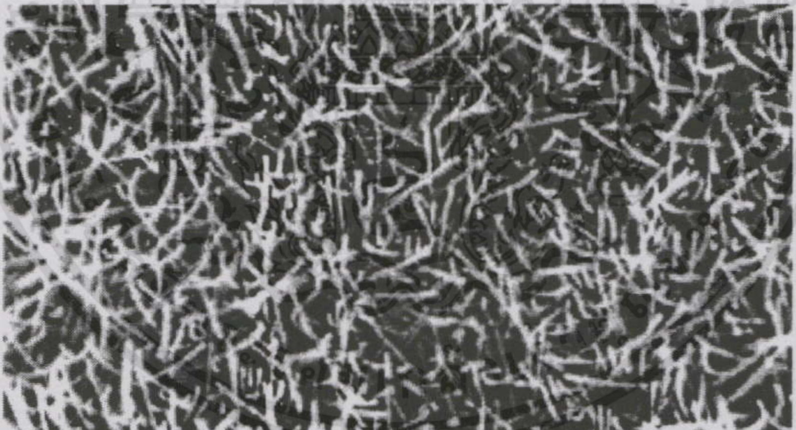
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอ CRT มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิและจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

เมื่อนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมมีลักษณะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



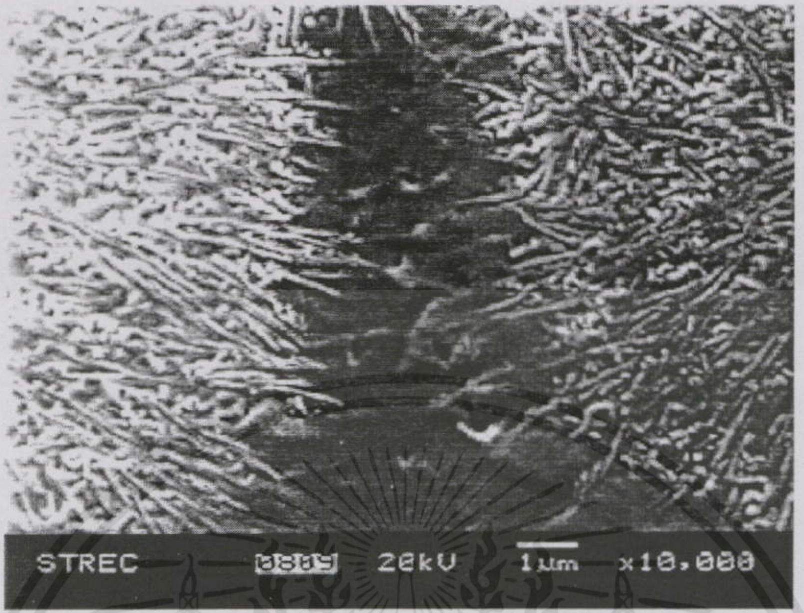
(ก) อุณหภูมิ 300 K



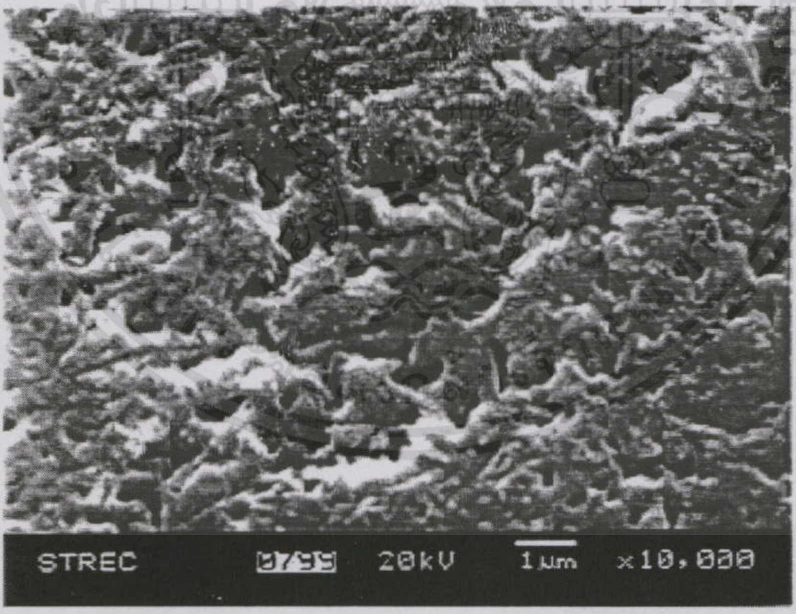
(ข) อุณหภูมิ 323 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด



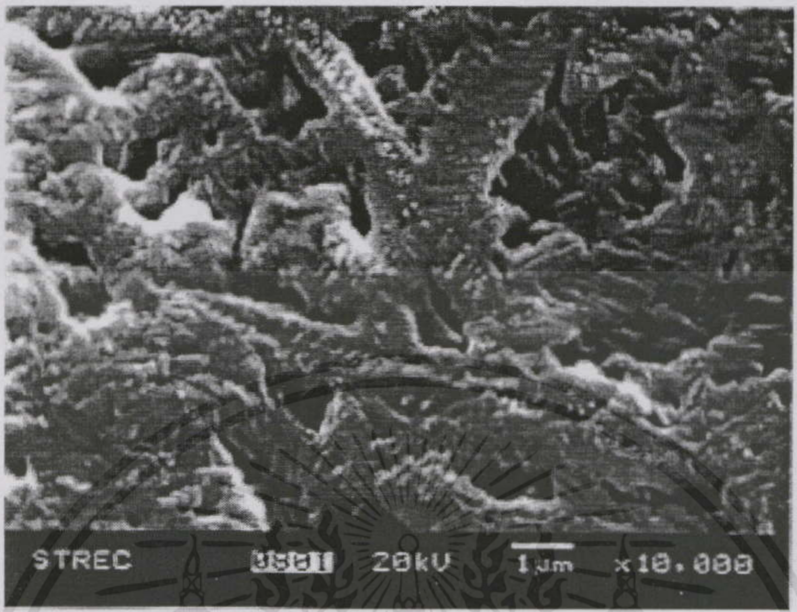
(ค) อุณหภูมิ 333 K



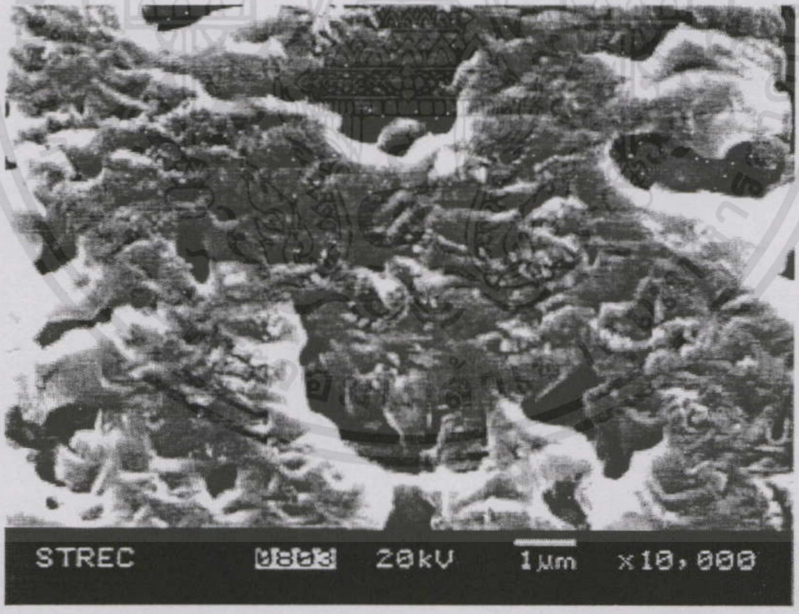
(ง) อุณหภูมิ 343 K

รูปที่ 4.4 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) อุณหภูมิ 353 K



(ฉ) อุณหภูมิ 363 K

รูปที่ 4.4 **(ต่อ)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

เครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงานเป็นอุปกรณ์เสริมของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ทำให้สามารถวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างได้

เมื่อนำฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมไปตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่ถูกแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆมีเพียงสารซีลีเนียมชนิดเดียวเท่านั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน

4.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

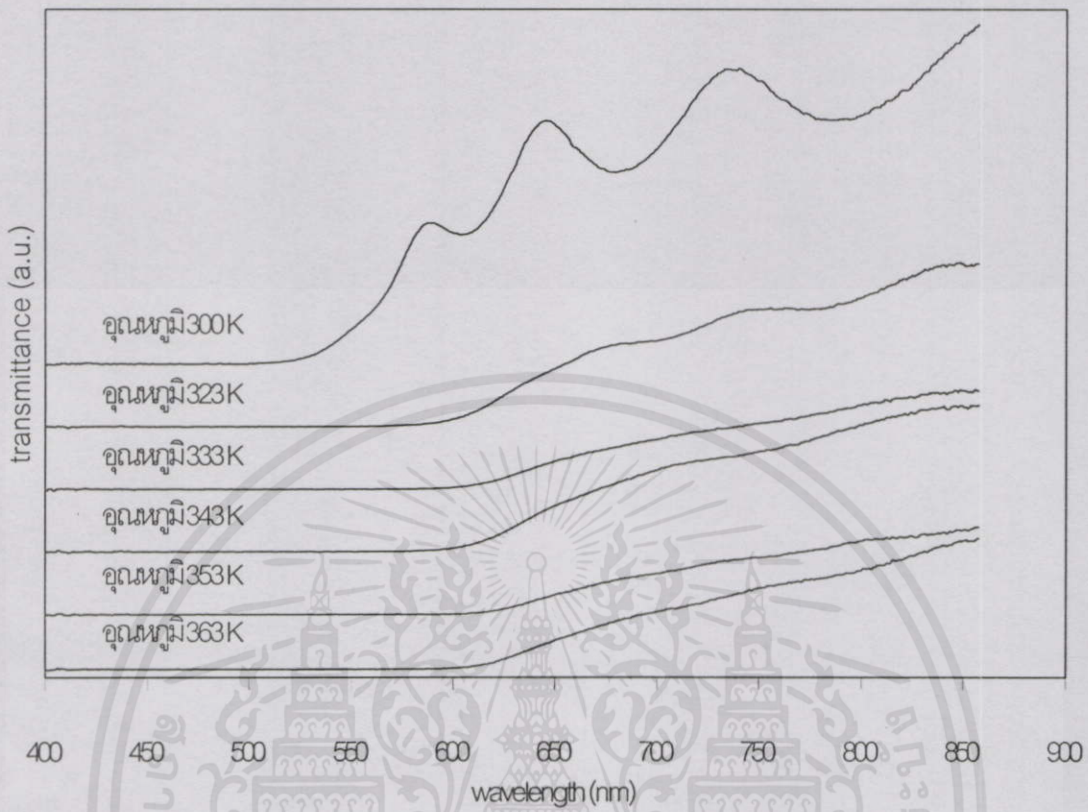
งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางแสงคือ การวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง และการคำนวณหาสัมประสิทธิการดูดกลืนของแสงเพื่อนำไปสู่การหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม

4.3.1 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

เมื่อแสงจากหลอดทังสเตนส่องผ่านโมโนโครเมเตอร์ซึ่งทำหน้าที่แยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผ่านการโฟกัสของเลนส์ไปตกกระทบฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม แสงส่วนที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมจะถูกดูดกลืนและแสงส่วนที่มีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมจะทะลุผ่านออกมา แสงส่วนที่ทะลุผ่านออกมาจะถูกโฟกัสผ่านเลนส์ลงบนตัวตรวจจับสัญญาณเพื่อเปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านทาง A/D card ไปที่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูล และคอมพิวเตอร์ยังทำหน้าที่ควบคุมสเตปปิงมอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ รูปที่ 4.6 แสดงผลจากการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม เมื่อแสงที่ส่องผ่านฟิล์มบางอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตร

จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 K หรืออะมอร์ฟัสซีลีเนียมยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 560 นาโนเมตรทะลุผ่านไปได้ ส่วนฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 323 – 363 K หรือเฮกซะโกนอลซีลีเนียมมีการยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 600 นาโนเมตรทะลุผ่านไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



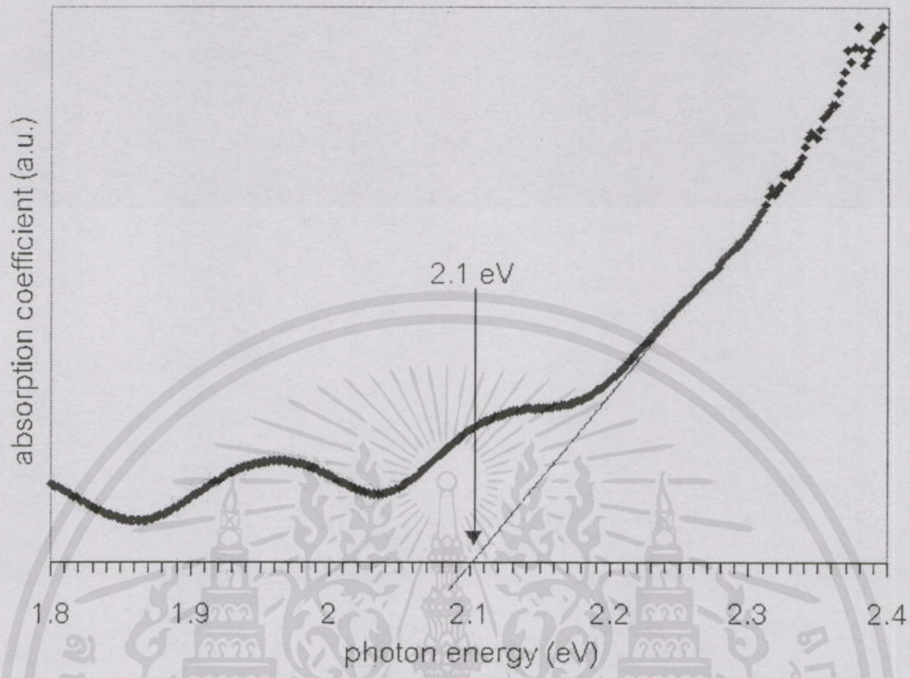
รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมจากการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

4.3.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโดยการคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม

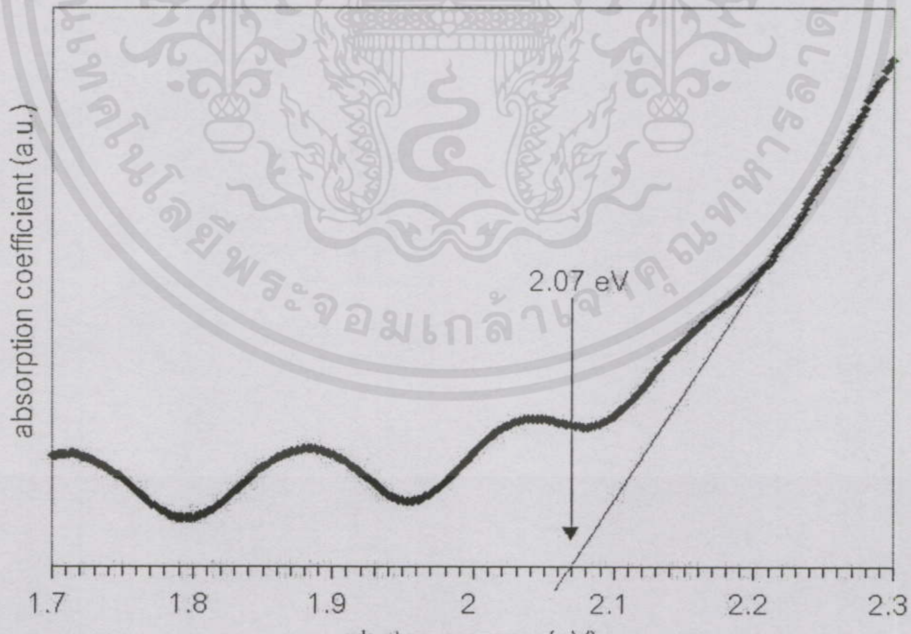
การดูดกลืนแสงในผลึกสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม แล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับค่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงซึ่งได้จากการนำค่าสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงมาคำนวณตามสมการที่ 2.15 มาเขียนกราฟแบบเทาซ์ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7 จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 K หรืออะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 2.1 eV และฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 323 – 363 K หรือเฮกซะโกนอลซีลีเนียมค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 1.83 - 2.07 eV ซึ่งสอดคล้องกับการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงคืออะมอร์ฟัส

ซีลีเนียมยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 560 นาโนเมตรทะลุผ่านส่วนเฮกซะโกนอลซีลีเนียมยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 600 นาโนเมตรทะลุผ่านไปได้



(ก) อุณหภูมิ 300 K

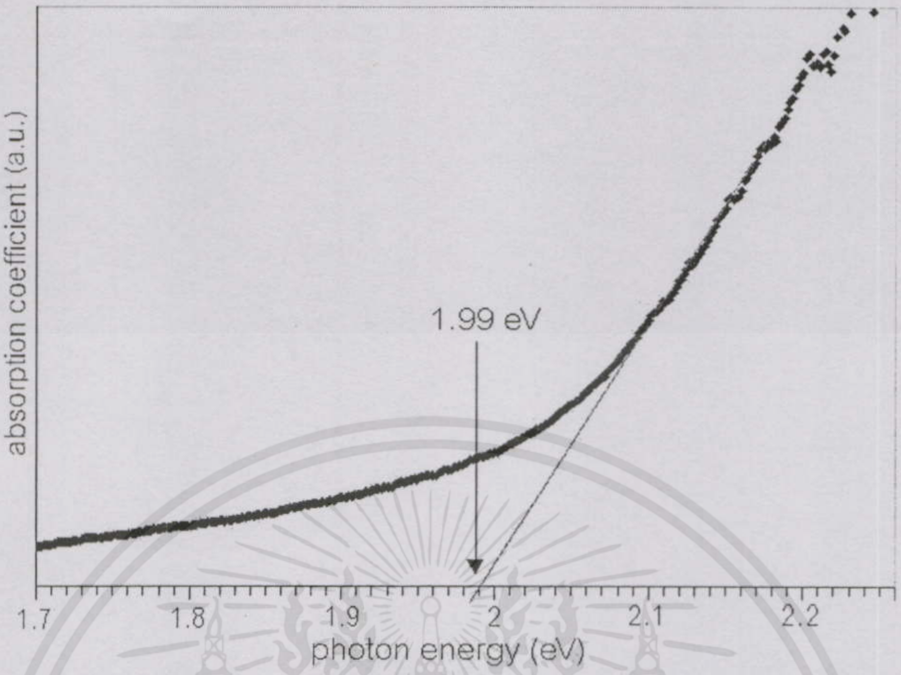


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

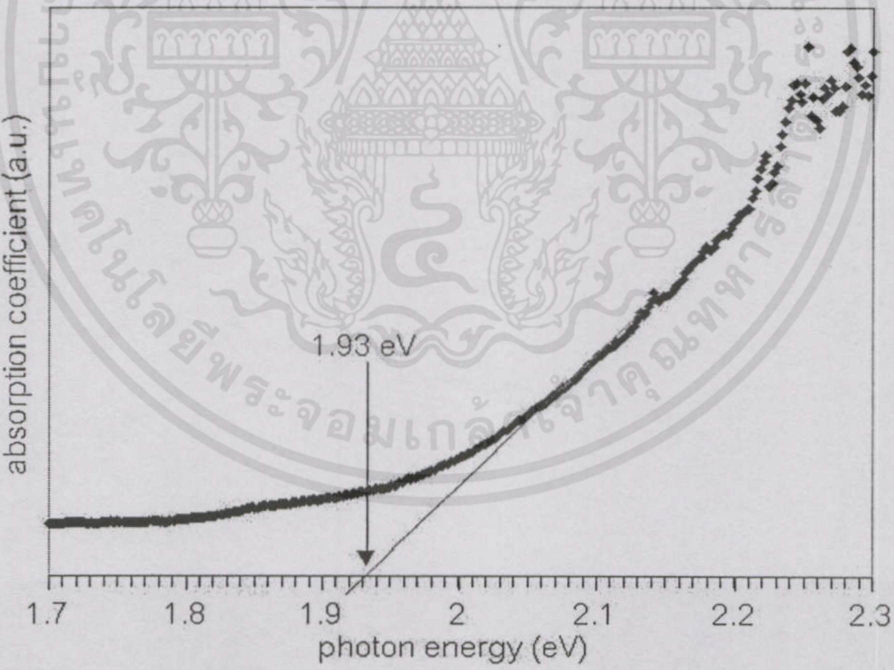
(ข) อุณหภูมิ 323 K

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม



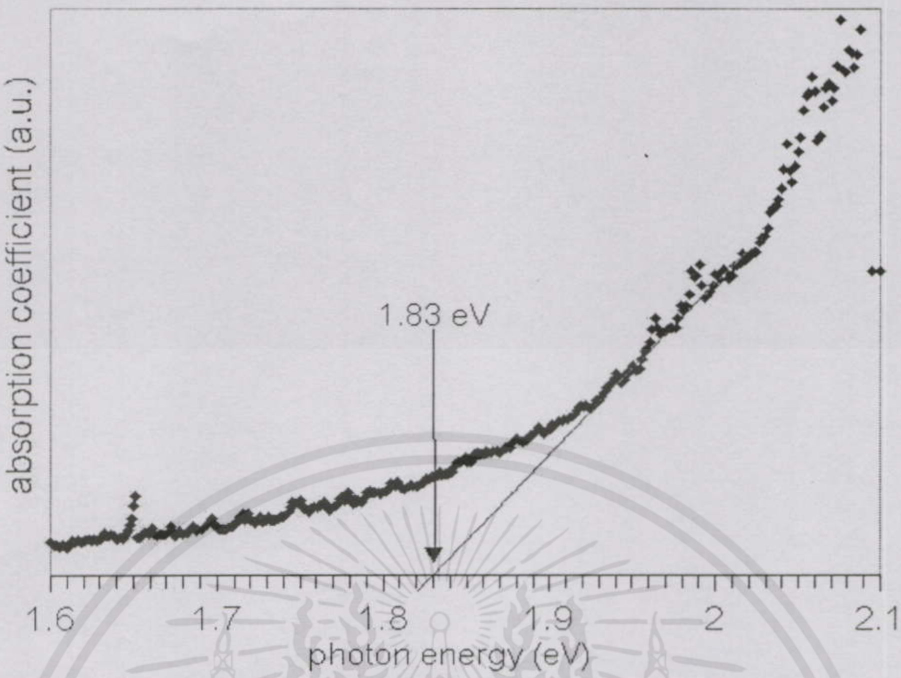
(ค) อุณหภูมิ 333 K



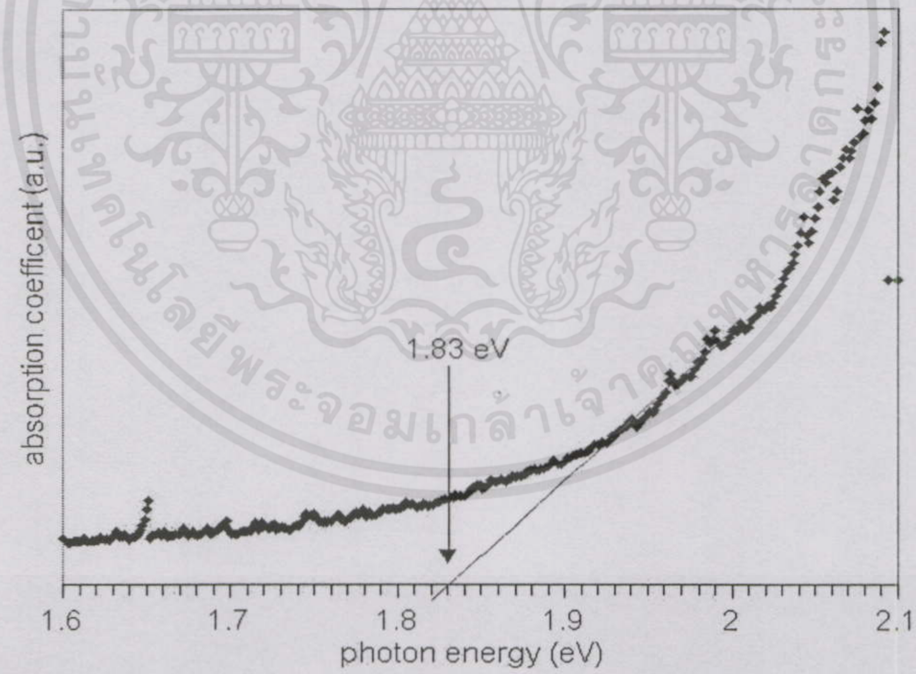
(ง) อุณหภูมิ 343 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 (ต่อ)



(จ) อุณหภูมิ 353 K



(ฉ) อุณหภูมิ 363 K

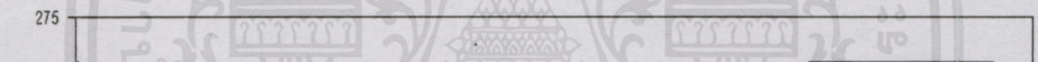
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 (ต่อ)

4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยการวัดค่าความต้านทานของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ระยะ 5 - 100 เซนติเมตร จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 4.8

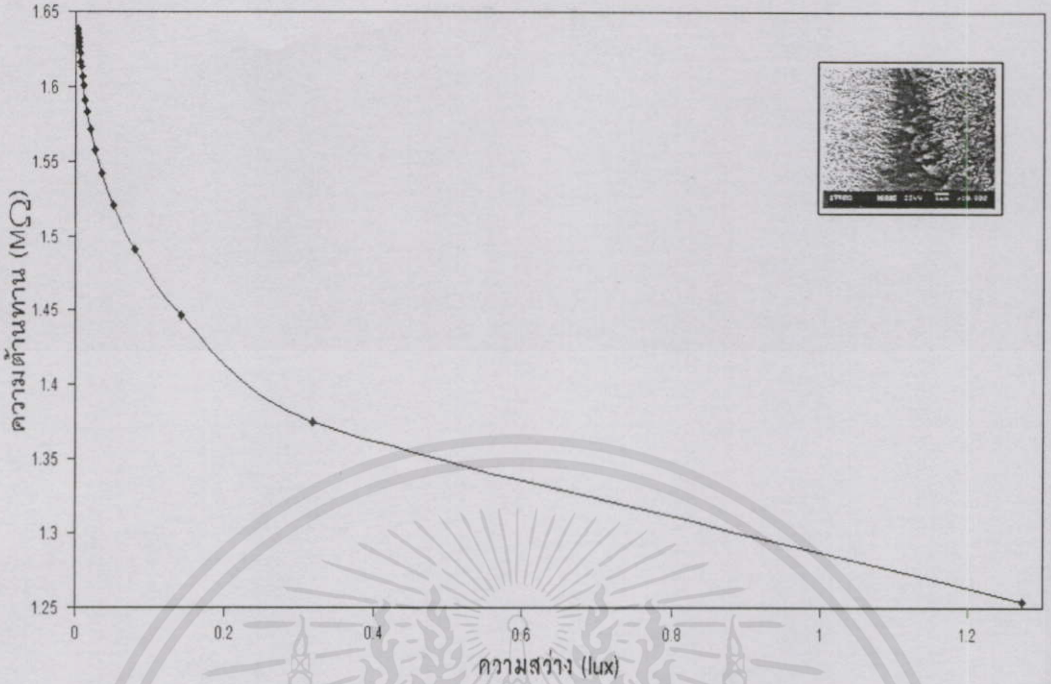
จากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานมีค่าลดลงแบบเอกโปเนนเชียลกับความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ทำจากฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 K 333 K และ 363 Kอยู่ในช่วง 250.2 – 272.9 kΩ 1.254 – 1.638 MΩ และ 4.1 – 4.62 MΩ ตามลำดับ กล่าวคือสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มีสมบัติเทียบได้เป็นตัวต้านทานเชิงแสงชนิดหนึ่ง (Optical resistor) เนื่องจากมีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง [8]



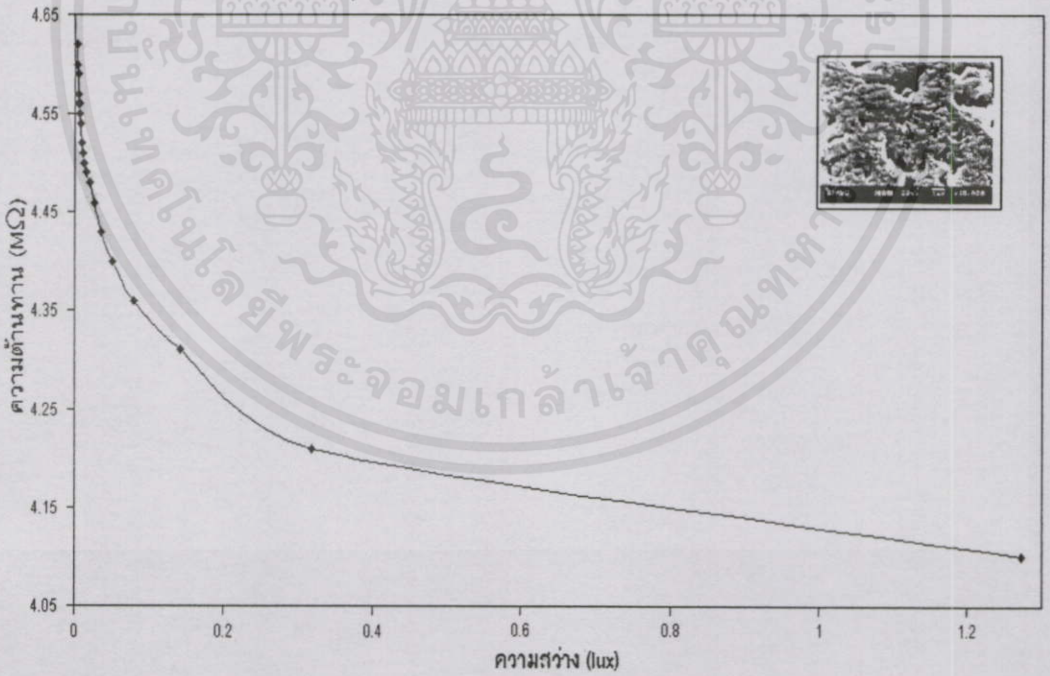
(ก) อุณหภูมิ 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ



(ข) อุณหภูมิ 333 K



(ค) อุณหภูมิ 363 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยวิธีต่างๆ พบว่าสมบัติของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่แอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆนั้นมีลักษณะต่างกัน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 K มีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัสซีลีเนียมและฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 323 - 363 K มีลักษณะเปลี่ยนไปเป็นเฮกซะโกนอลซีลีเนียม และเมื่อตรวจสอบค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่แอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆนั้นพบว่ามีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีลเช่นกัน

กล่าวคืออุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียม [1,16] เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีการเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบและมีแขนขาดหรือจุดว่างซึ่งเป็นจุดบกพร่องในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสอยู่มาก ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจึงมีค่าสูง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะคอยดักจับอิเล็กตรอนที่เข้ามาใกล้ทำให้สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่ำ วิธีลดจำนวนแขนขาดทำได้สองวิธีคือ การเติมสารเจือเพื่อสร้างพันธะระหว่างอะตอมของสารเจือและอะตอมที่มีแขนขาด วิธีที่สองคือ การแอนนีลหรือการให้ความร้อนเพื่อให้จุดบกพร่องในเนื้อสารมีการจัดเรียงตัวให้อยู่ในโครงรูปที่มีอิเล็กตรอนอิสระน้อยลงและมีความเป็นผลึกมากขึ้น เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส อะตอมจะเกิดการสั่นทำให้มีพลังงานที่เกิดเนื่องจากการสั่นทางความร้อน พลังงานที่เกิดเนื่องจากการสั่นทางความร้อนจะกระตุ้นอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่มากมายให้เคลื่อนที่แบบสุ่ม ทำให้เกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในจุดว่างและเกิดการสร้างพันธะระหว่างอะตอม ส่งผลให้ภายในสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นผลึกมากขึ้น

เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสสูงขึ้นจะเริ่มมีผลึกเกิดขึ้นในช่วงแรกและผลึกจะมีขนาดโตขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) อุณหภูมิต่ำสุดสำหรับการเกิดผลึกใหม่เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ซึ่งจะมีค่าประมาณ $\frac{1}{3}$ ถึง $\frac{1}{2}$ ของอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว ถ้าอุณหภูมิที่ใช้แอนนีลมากกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ผลึกจะค่อยๆมีขนาดโตขึ้นโดยการดูดกลืนผลึกข้างเคียงที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากที่บริเวณขอบของผลึกมีพลังงานสูง ขอบเขตของการโตของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้แอนนีล ถ้าอุณหภูมิสูงขนาดของผลึกจะโตขึ้น และเวลาในการแอนนีลขนาดของผลึกจะโตเร็วในช่วงแรกและจะค่อยๆช้าลงเมื่อเวลามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นทรัพยากรที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมเตรียมโดยวิธีระเหยสารในสุญญากาศ โดยเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิต่างกันและนำไปตรวจสอบสมบัติเฉพาะ ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และวิเคราะห์ธาตุประกอบโดยเครื่องสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน การตรวจสอบแถบพลังงานต้องห้าม โดยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง และการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยการวัดค่าความต้านทานและความเข้มแสงที่ตกกระทบ

จากการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยวิธี XRD พบว่าฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิตั้งแต่ 323 เคลวิน มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งเรียกว่า γ-Se ส่วนฟิล์มบางซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน (อุณหภูมิห้อง) มีโครงสร้างเป็นแบบอะมอร์ฟัส หรือ a–Se ดังรูป 4.3 พบว่าเมื่อตรวจสอบแล้วพบ peak ของความหนาแน่นของสถานะ ที่มุม 23.52 องศา และ 29.73 องศา ชัดเจนขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้แอนนีลส่วนในกรณีอะมอร์ฟัส หรือ a–Se นั้นพบว่า peak ของความหนาแน่นของสถานะไม่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลจากภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมด้วยวิธี SEM ที่แสดงในรูปที่ 4.4 คือในกรณีที่เป็นอะมอร์ฟัสซีลีเนียม พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบาง a–Se มีลักษณะเป็นหนาม แต่ฟิล์มบาง γ-Se มีลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางเป็นกลุ่มก้อนของผลึกมากขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้แอนนีล ดังนั้นสรุปได้ว่าแผ่นฟิล์มที่ถูกแอนนีลที่อุณหภูมิตั้งแต่ 323 เคลวิน จะมีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอล ซึ่งเรียกว่า γ-Se และในแผ่นฟิล์มบางซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งเรียกว่า a–Se จากการวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีภายในฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 363 เคลวิน พบว่าภายในฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมมีธาตุซีลีเนียมเพียงชนิดเดียวเท่านั้น แสดงผลดังรูปที่ 4.5 สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้แอนนีล ไม่มีผลต่อการเจือปนจากธาตุต่างๆในบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.7 เป็นการตรวจสอบค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) พบว่าฟิล์มบาง a–Se มีค่า E_g เท่ากับ 2.1 eV และฟิล์มบาง γ-Se มีค่า E_g เท่ากับ 1.83 – 2.07 eV ดังนั้นสรุปได้ว่าการแอนนีลมีผลต่อแถบพลังงานต้องห้าม คือทำให้แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลง และจากผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในรูปที่

4.8 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมและความเข้มแสงที่ตกกระทบ มีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาการเตรียมฟิล์มบางแอนนีลซีลีเนียมในการใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องระบบในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศเป็นการระเหยสารจากแหล่งเดียวเท่านั้น และยังไม่สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มบางที่แน่นอนได้ จึงควรมีการพัฒนาระบบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางขั้นต่อไปเพื่อให้สามารถประยุกต์เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางให้มีความแน่นอนและหลากหลายตามความเหมาะสมของแต่ละงานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ดุสิต เครืองาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน**. เล่มที่ 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
2. Madan, Arun and Melvin, P. Shaw. **The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors**. San Diego : Academic Press. 1988.
3. จิติ หนูแก้ว. "การพัฒนาระบบระเหยในสุญญากาศควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์." **คอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์เวิร์ด,** ฉบับที่ 129, 2533. หน้า 59-74.
4. ศุภสโรช หมื่นสิทธิ์. **ฟิสิกส์ของวัสดุ**. กรุงเทพฯ : สหมิตรออฟเซต. 2535.
5. Cullity, B.D. **Elements of X-Ray Diffraction**. 2^{nd} ed. Notre Dame : Addison-Wesley. 1978.
6. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนสำหรับงานด้านวัสดุศาสตร์**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
7. โยธิน วงศ์ประเสริฐ. **"เทคโนโลยีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี** Combustion Activation." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
8. ดุสิต เครืองาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน**. เล่มที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
9. Schroder, Dieter K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. 2^{nd} ed. Canada : John Willey & Sons. 1998.
10. Mott, N.F. and Davis, E.A. **Electronic Processes in Non-crystalline Matterials**. 2^{nd} ed. Oxford : Oxford University Press. 1979.
11. Ciureanu, P. and Middelhoek, S. **Thin film resistive sensors**. London : Plenum Press. 1992.
12. Tauc, J. **Amorphous and Liquid Semiconductors**. Newyork : Plenum Press. 1974.
13. Wolfe, Charies M. and Stillman, Gregory E. **Physical Properties of Semiconductors.** United States of America : Prentice-Hall International. 1989.
14. ลัดดาวัลย์ สุภาดี. "การปลูกผลึกเพชรด้วยเทคนิค Hot Filament Chemical Vapor Deposition." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

15. Kaplow, Roy. "Atomic Arrangement in Vitreous Selenium." **Physical Review**, vol. 3, no. 168, 1968. pp. 1068-1079.

16. Popescu, M. "Thermal Stability of Se/CdSe MultiLayers." **IEEE**, 1996 pp. 301-304.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตาราง 1 แสดงมุมของแต่ละระนาบของเฮกซะโกนอลซีลีเนียมชนิดแกมมา

2th	h	k	l
23.517	1	0	0
29.706	1	0	1
41.305	1	1	0
43.649	1	0	2
45.354	1	1	1
48.104	2	0	0
51.721	2	0	1
55.660	0	0	3
56.141	1	1	2
61.211	1	0	3
61.662	2	0	2
65.238	2	1	0
68.255	2	1	1
71.590	1	1	3
76.517	2	0	3
76.882	2	1	2
78.153	3	0	1
81.757	1	0	4
86.618	3	0	2
90.998	2	1	3
95.944	2	0	4
97.316	3	1	1
106.880	1	0	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2 แสดงมุมของแต่ละระนาบของเฮกซะโกนอลซีลีเนียมชนิดเบตา

2th	h	k	l
14.524	0	1	1
19.079	0	0	2
19.713	-2	1	1
20.442	2	1	1
22.011	0	2	0
22.807	-1	1	2
22.986	-2	0	2
23.523	3	1	0
24.232	2	0	2
24.872	-1	2	1
25.165	1	2	1
26.064	-2	2	0
27.787	4	0	0
29.287	0	2	2
29.716	-3	1	2
31.016	-4	1	1
31.601	-3	2	1
32.043	-2	2	2
32.304	3	2	1
32.965	2	2	2
33.293	-2	1	3
34.022	1	3	0
34.813	4	0	2
35.729	4	2	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3 แสดงมุมของแต่ละระนาบของเฮกซะโกนอลซีลีเนียมชนิดอัลฟา

2th	H	k	l
12.375	0	1	1
12.437	1	0	1
13.813	-1	1	0
15.725	-1	1	1
15.852	1	1	1
19.559	0	2	0
20.732	1	1	2
21.015	0	2	1
21.934	2	1	0
23.175	-1	2	1
24.893	0	2	2
25.093	2	0	2
27.014	1	1	3
28.823	-2	2	1
28.967	2	2	1
30.527	0	3	1
31.227	3	1	0
31.774	-2	1	3
32.161	1	3	1
32.364	0	1	4
33.395	0	3	2
34.925	1	3	2
35.108	3	1	2
35.685	2	3	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุพรรณี แจ่มสว่าง เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2540

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้