

อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของฟิล์มบาง CdSe
IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF CdSe THIN FILMS



นางสาวพรหมพักตร์ ศาวัดดี

นางจิรยพธ

คณบดีฝ่าย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของฟิล์มบาง CdSe
IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF CdSe THIN FILMS



นางสาว พรหมพักตร์ ดาวัลต์
นาย จิรยุทธ ดอนอินชัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF CdSe THIN FILMS



Miss PROMPAK DAWAN

Mr. JIRAYOOT DONINCHAI

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


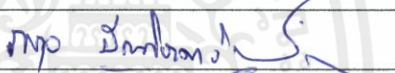



ACADEMIC YEAR 2012

หัวข้อโครงการพิเศษ อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของฟิล์มบาง CdSe
 IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF CdSe THIN FILMS

ชื่อนักศึกษา นางสาว พรหมพัชร์ ดาวัลด์
 นาย จิรยุทธ คอนอินชัย

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์
 ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
อาจารย์ ภารุจ บัณฑิตธาวินัย	
ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ	
อาจารย์ ณัฐพร พรหมรส	
รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้แจกจ่ายข้อมูล และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีของฟิล์มบาง CdSe
ชื่อนักศึกษา	นางสาว พรหมพัชร์ ดาวัดต์
	นาย จิรยุทธ คอนอินชัย
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ ได้จัดทำเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อเคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แล้วจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โครงสร้างผลึกและผิวหน้าของฟิล์มบางสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบเฮกซะโกนัลที่มีการจัดเรียงตัวของระนาบ (002) อย่างโดดเด่นและเกรนมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ในรายงานนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ จากผลการทดลองพบว่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าของฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความถี่ที่เพิ่มขึ้น ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิและความถี่ดังกล่าวข้างต้นจะแสดงถึงพฤติกรรมการผ่อนคลายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In และกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะในฟิล์มบางนี้สอดคล้องดีกับแบบจำลองการกระโดดข้ามกำแพงศักย์

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Impedence Spectroscopy of CdSe Thin Films
Students	Miss. Prompruk Dawan Mr. Jirayoot Doninchai
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Applied Physics
Academic Year	2012
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this special project, In doped- CdSe thin films were deposited by thermal vacuum evaporation onto slide glass substrate. The as- deposited films were thermally annealed in nitrogen atmosphere and crystal morphology were investigated by XRD and SEM, respectively. The structure was found to be hexagonal wurtzite with preferential orientation along a (002) plane and crystallite size less than 100 nm. The affect of measuring temperature and frequency on the electrical properties of the thin films were studied and explained in this report. The experimental studies indicated that capacitance and conductance increase with measuring temperature and frequency. The data of complex impedance measurements over the same range of temperature and frequency are used to describe the relaxation behavior of the CdSe:In thin films. The transport behavior of carriers in the films is consistent with the correlated barrier hopping model.

Keywords : CdSe:In thin films, XRD, SEM, complex impedance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ ดร.ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน Cu_α 1.5406 อังสตรอมในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในหองปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการกระทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณ พ่อแม่ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนการเล่าเรียน และเป็นกำลังใจตลอดมา

นางสาว พรหมพัคตร์ ดาวัลต์

นาย จิรยุทธ

ดอนอินชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	4
1.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสง	4
1.4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารกึ่งตัวนำ	5
2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	6
2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	6
2.4.2 ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้น	7
2.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	7
2.3 โครงสร้างของผลึก	
2.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	7
2.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์	8
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	12
2.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การส่งผ่านแสง	15
2.7 การศึกษาโครงสร้าง ผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร CdSe เจือด้วยสาร InSe	17
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	18
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสาร CdSe เจือด้วยสาร InSe	18
3.1.4 วิธีการแอนนีกัล	19
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสาร CdSe เจือด้วยสาร InSe	
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสาร CdSe เจือด้วยสาร InSe	20
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	22
3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CdSe เจือด้วยสาร InSe ด้วยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	22
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของสารตัวอย่างที่เป็นสาร CdSe ที่เจือด้วยสาร InSe	
3.3.1 การศึกษาเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	26
3.3.2 การศึกษาเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	27
3.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	34
4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ	37
4.4 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	38
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีกายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	43
4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิในช่วง 24 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	47
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ประวัติผู้เขียน	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	11
ตารางที่ 4.1	ค่าช่องว่างแถบพลังงานและขนาดของส่วนหางของแถบพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอลนีสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 30 นาที	49
ตารางที่ 4.2	ค่าความต้านแผ่นของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In	53
ตารางที่ 4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe: In ที่ เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำสารกึ่งตัวนำและฉนวน	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdSe	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของผลึก CdSe	9
รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์	9
รูปที่ 2.5 การบอกระนาบต่างๆของผลึก	11
รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร์ริก	12
รูปที่ 2.7 ส่วนหางของแถบพลังงาน	14
รูปที่ 2.8 กราฟระหว่าง $\ln\alpha$ กับพลังงาน ของฟิล์มบาง CdSe แอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ	14
รูปที่ 2.9 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	15
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	17
รูปที่ 3.2 ระบบเตาแอนนีลที่สามารถใช้งานได้ถึง 500 องศาเซลเซียส	20
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In	24
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้	26
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตเมตรีชื่อ Bruker รุ่น D8 Advance	27
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ JEOL รุ่น JSM-6400	27
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ชื่อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ions α	28
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด ค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส	28
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R	29
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่	30
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($ Z $) กับความถี่ (f)	32
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f) และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$	32
รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ค่า	33
รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($ Z $) กับ ความถี่ (f)	33

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่แผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสตามลำดับ	43
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	44
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส	46
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ h เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีกายได้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	48
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าส่วนหางของแถบพลังงาน (Eu) กับอุณหภูมิแอนนีกายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อมีการแอนนีกายได้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	50
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับอุณหภูมิแอนนีกายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีกายได้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	51
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดทั้งในกรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และมีการแอนนีกายได้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนیلเมื่อทำการวัดทั้งในกรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	54
รูปที่ 4.11 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	55
รูปที่ 4.12 การติดตั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที บนแท่นยึดสารตัวอย่างเพื่อทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ในช่วงโดยใช้ความถี่ 100 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์	56
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	59
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $ln\sigma_{ac}$ กับ $ln\omega$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	60
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขยกกำลัง S กับอุณหภูมิที่ใช้วัดที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	61
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจลนภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	63
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	64
รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ศึกษาการจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบาง	65
รูปที่ 4.21 การจำลองค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนโดยใช้ความถี่ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที	67
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถนำมาจ่ายให้กับเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานเพื่อเอื้อต่อการดำรงชีวิตไม่ว่าจะเป็นเครื่องสร้างสิ่งตอบสนองพื้นฐาน ความต้องการของมนุษย์ (ปัจจัยสี่) เครื่องมืออำนวยความสะดวกสบายและความบันเทิง (เช่นรถยนต์ พาหนะเพื่อการคมนาคม เครื่องมือสื่อสาร โทรคมนาคม) หรือจนไปถึงเครื่องมือทางการแพทย์เพื่อช่วยชีวิต พลังงานในรูปแบบที่แพร่หลายที่สุดรูปแบบหนึ่งในปัจจุบัน คือ พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากความสะดวกในการกักเก็บและการแปลงรูปให้เป็นพลังงานอื่นในการใช้งานโดยทั่วไป พลังงานไฟฟ้ามักจะผลิตจากพลังงานความร้อน จากเชื้อเพลิง เช่นน้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงในทุกวันนี้มีราคาผันผวนสูงเป็นพลังงานสิ้นเปลืองอันจะหมดสิ้นไปในเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับอายุไขของโลกที่เหลืออยู่และก่อให้เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมของโลกในแง่ของปรากฏการณ์เรือนกระจก (ทำให้โลกร้อนขึ้น) ดังนั้นจึงเริ่มพิจารณาถึงแหล่งพลังงานอื่นๆ ที่สะอาดไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้และเป็นพลังงานใช้ไปได้ยาวนาน เช่นพลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนจากใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานที่ได้จากโรงไฟฟ้า พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสืบเนื่องจากความแปรปรวนของทั้งบรรยากาศโลกและตัวโลกเองทำให้การสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพเองไม่สามารถกระทำได้โดยสะดวกเช่นการเปลี่ยนทิศของลมมรสุมเนื่องจากอุณหภูมิโลกที่เปลี่ยนไปและยังต้องเลือกบริเวณที่มีปริมาณลมเพียงพอต่อการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า หรือการเลื่อนของเปลือกโลกที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวอันจะทำความเสียหายต่อเขื่อนผลิตไฟฟ้า และยังทำลายสมดุลธรรมชาติ ส่วนพลังงานความร้อนใต้พิภพเมื่อเทียบกับพลังงานอื่นๆ จัดอยู่ในสเกลที่นำมาใช้งานได้น้อยมากและยังขึ้นอยู่กับสถานะภูมิประเทศเป็นหลักส่วนพลังงานจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ก็ยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้างและถอดทิ้ง ทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัย ที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทนที่จัดได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในทศวรรษนี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลภาวะเป็นพิษใดๆ สาดส่องไปทุกที่และดวงอาทิตย์ยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนานและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยรวมถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาถูกลงกว่าแหล่งพลังงานประเภทอื่นเมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีก

ต่อไปและประการสำคัญคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืน ไม่มีที่สิ้นสุด ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายเช่น ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร ระบบสูบน้ำ ระบบแสงสว่าง ระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น ประจุแบตเตอรี่และขายคืนให้กับสายส่ง เป็นต้น (ยงยุทธ, 2548)

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic หรือ solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงทันที และไฟฟ้าที่ได้นั้น จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (คุสิต, 2542)

CdSe เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีสมบัติทางแสงที่ดีเยี่ยมในช่วงตามองเห็นได้ พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าเท่ากับ 1.74 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตดี เทกเตอร์ ไดโอดเปล่งแสง และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อื่นๆ ชรีกันธาน และผู้ร่วมงาน (Shreekan thanetal, 2003) พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมที่อุณหภูมิห้อง จะมีการเกาะกลุ่มกันของอะตอมของธาตุ Se ทำให้เนื้อฟิล์มส่วนใหญ่มีอัตราส่วนของอะตอมของธาตุ Cd:Se มีค่ามากกว่า 1 แต่ถ้าเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะได้ฟิล์มบางที่เป็นไปตามสโตยคิโอเมตริ มีเนื้อฟิล์มสม่ำเสมอ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หรือแบบเฮกซะโกนัล แต่บางครั้งพบว่า เป็นเฟสผสมระหว่างซิงค์เบลนด์ และเฮกซะโกนัล เกิดได้จากการแอนนิลด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิสูง หรือโดยการขัดสีเป็นต้น

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe สามารถเตรียมได้จากหลายวิธีเช่น การเคลือบโดยไอระเหยทางฟิสิกส์ การเคลือบโดยไอระเหยทางเคมี สปีดเตอริง การพ่นเคลือบโดยละอองสารเคมี (spray pyrolysis)

การเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี และการอบสารละลายเคมีเป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้ความสนใจกันมาก เนื่องจากใช้พลังงานไม่มาก ใช้เวลาน้อย สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเตรียมฟิล์มบางได้ดี และสามารถที่จะพัฒนาให้ฟิล์มบางมีขนาดใหญ่ได้อีกด้วย

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับให้มีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมได้ไปแอนนิลในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ขึ้นต่อไปจึงนำเอาฟิล์มบางไปศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของฟิล์มบางโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงผ่านที่ความยาวคลื่น 500-1000 นาโนเมตร ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดย

การวัดความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงและไม่มี การฉายแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจน สำหรับหัวข้อสุดท้ายเป็นการศึกษา สมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันต่ำ ความถี่ ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์และในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยอะตอม (5 at. %) โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อน ภายในระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) ภายใต้อุณหภูมิ 100, 200, 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซ ในโตรเจนเป็นเวลานาน 30 นาที
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงที่ขึ้นอยู่กับการแอนนัลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) โดยวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเมื่อทำการฉายแสงที่มีค่าความยาวคลื่น 300 ถึง 1,000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะทางโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
- 1.2.6 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) โดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิกับอุณหภูมิ ในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) ซึ่งเคลือบลงบนกระจกสไลด์เตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ
- 1.3.2 ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) ภายใต้ภายใต้บรรยากาศก๊าซ ในโตรเจน ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

1.4 ขั้นตอนงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีตลอดจนผลงานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์และเผยแพร่มาแล้วที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5 at. %) ที่เคลือบลงบนแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

- 1.4.2 ทำการแอนนیلฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้ก๊าซ ไนโตรเจนนาน 30 นาที
- 1.4.3 ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-rays diffraction method)
- 1.4.4 ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope :SEM)
- 1.4.5 นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบด ทำการฉายแสงที่ค่าความยาวคลื่น 300 ถึง 1,000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
- 1.4.6 นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.5.2 ทำให้ทราบวิธีการแอนนیل ที่อุณหภูมิต่างๆผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบาง
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขวิธีการเตรียมฟิล์มว่าเตรียมอย่างไรจึงจะได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

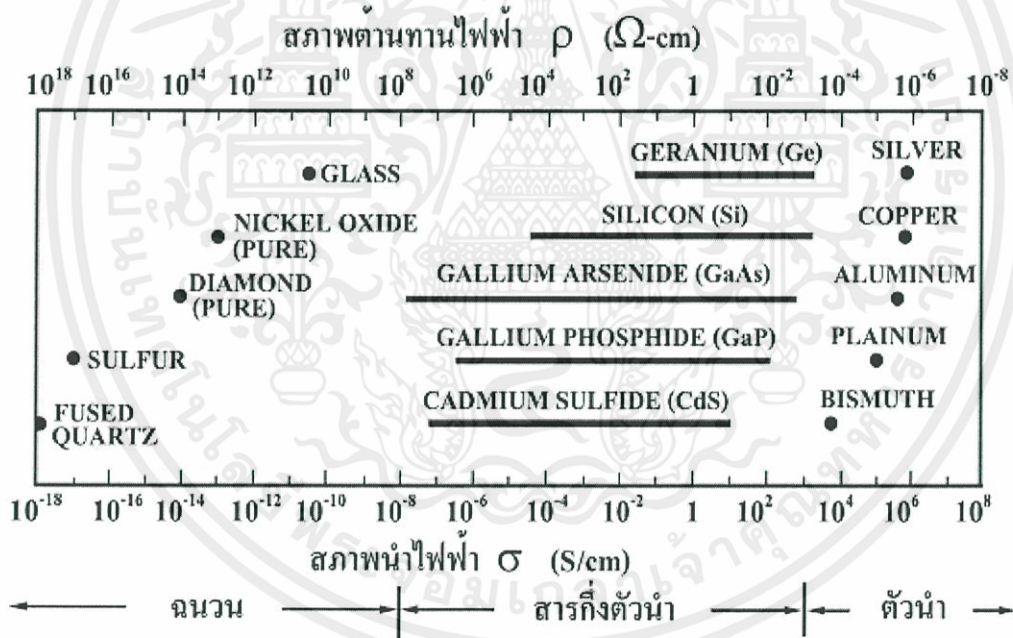
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2530; งามนิศย์, 2530; งามนิศย์ 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1975)

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนโดยพบว่าโลหะมีสมบัติเป็นตัวนำที่ดี ส่วนฉนวนมีการนำไฟฟ้าได้น้อย และในสภาพปกติหรือ ที่อุณหภูมิห้อง สารดังกล่าวจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-18} ถึง 10^8 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-18} ถึง 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สำหรับตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าที่สูงโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^8 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและฉนวน

นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังมีสมบัติที่แตกต่างจากสารอื่น ๆ อีกดังนี้

1. สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ (thermister action) หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่ง คือ มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนความต้านทานตามอุณหภูมิไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีคุณสมบัติปองเนื้อหายิ่งขึ้นต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้เป็นลบ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะลดต่ำลง

2. มีสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านทางเดียวหรือเปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสไฟตรง (retifying effect)
3. สภาพนำไฟฟ้าของสารจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเจือหรืออาจกล่าวได้ว่าสารเจือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป
4. เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (อาจเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น กล่าวได้อีกนัยหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง)
5. เมื่อได้รับความร้อนจะให้กำลังงานทางไฟฟ้าสูง (high thermoelectric power)
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) แม้ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก (ฐิตินัย 2546; ฐิตินัย 2549 ; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Cullity, 1956)

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของ โครงสร้างผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

2.2.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดนี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปหรืออาจจะเรียกว่าอีกอย่างว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)

ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงสร้างผลึกแต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก แต่จะเข้าไปแทรกกระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีค่าอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์และของอย่างอื่นซึ่งเจ้าของลิขสิทธิ์พึงมีกรรมสิทธิ์ และ (ข) ร่วมกัน โดยมีจำนวนเท่าๆกัน

- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (anti structure disorder) ก็อาจจะเกิดลักษณะของอะตอมตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไปเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.2.2 ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้น

ข้อบกพร่องแบบผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน (dislocation) เกิดจากความผิดปกติของจุดของโครงผลึกตั้งแต่สองจุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชันอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู

2.2.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ คือการเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกันและมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มารจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันเรียกว่าขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆไปจากผลึกในอุดมคติ

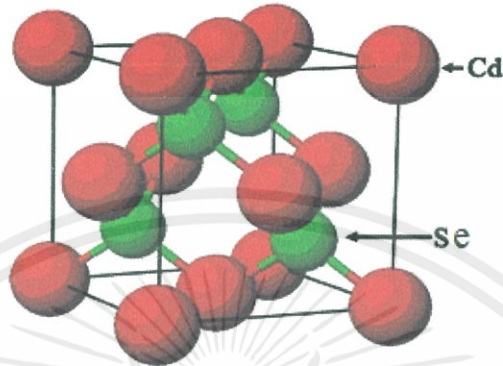
2.3 โครงสร้างของผลึก (ฐิตินัย 2546; ฐิตินัย 2549 ; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Cullity, 1956)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า คุณสมบัติการดูดกลืนแสง ฯลฯ

2.3.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.3 มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดหรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่ แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นในสารกึ่งตัวนำ CdSe อะตอมของธาตุ Cd ทั้งสี่จะอยู่ที่ตำแหน่ง (000), $(0 \frac{1}{2} \frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2} 0 \frac{1}{2})$

และ $(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0)$ ส่วนตำแหน่งของอะตอม Se ทั้ง 4 อะตอมจะอยู่ที่ $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4})$ และ $(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4})$ สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ สารประกอบประเภท ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdSe เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

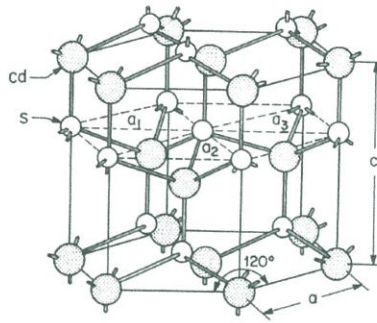


รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdSe

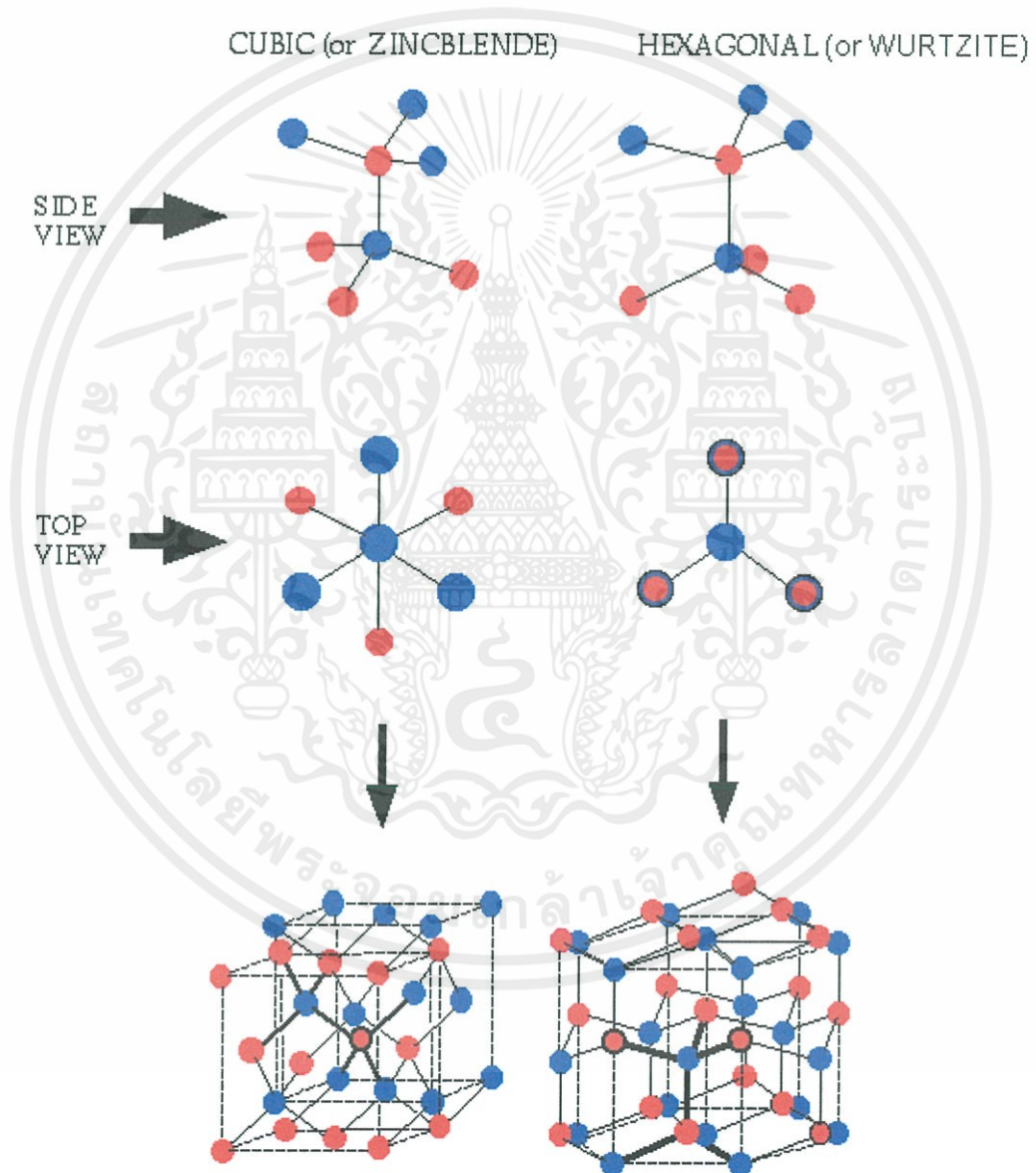
2.3.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ อยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{5}{8}$ เท่าตามแนวแกน c (c-axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัล เป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวริทไซต์ของสารกึ่งตัวนำ CdSe



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวริทไซต์กับแบบซิงค์เบลนด์ระโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของคริสตัล

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่า ตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง

2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u v w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2}1]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบจะใช้อักษร $(h k l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หาคระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทางการบอกระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

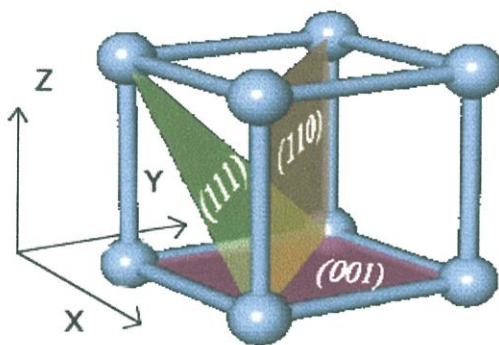
1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หาคระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหาคระนาบใดตัดแกนลบ (—) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (—) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ ตารางที่ 2.1 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

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

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

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

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเอกสารนี้เป็นเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ประโยชน์ด้านการคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (จูตินัย, 2546; จูตินัย, 2549 ; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Cullity, 1956)

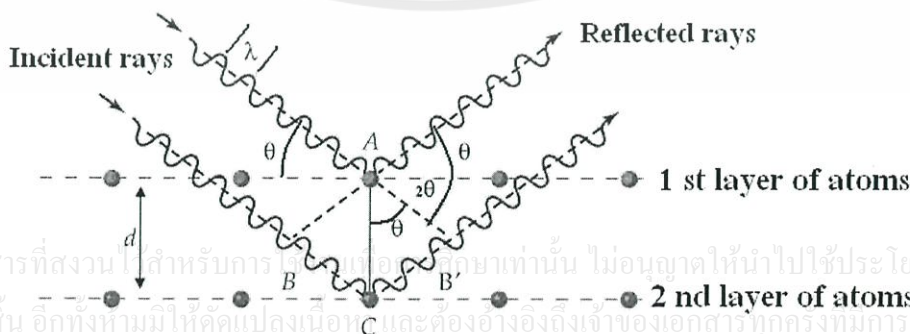
การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยวิธี θ - 2θ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี ค.ศ. 1912 ดับเบิลยู เอช แบรกก์ (W.H. Bragg) และ ดับเบิลยู แอล แบรกก์ (W.L. Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอม ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	θ	คือ	มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,...

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไประนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใน โครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาได้ในแต่ละโครงสร้างผลึกดังนี้

2.4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบคิวบิก (cubic) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

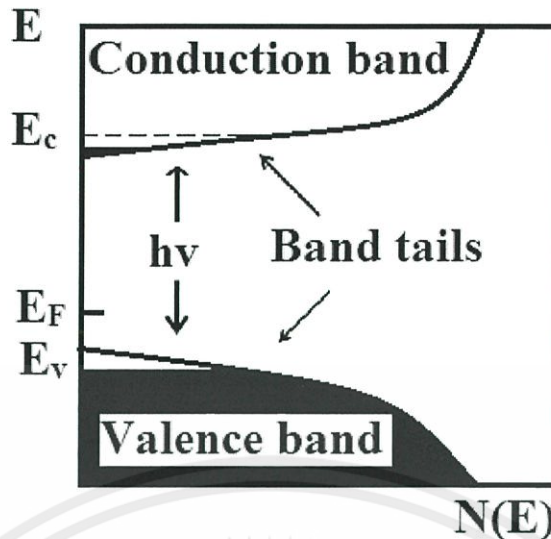
เมื่อ a คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก
 h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อของระนาบ

2.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน (งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2553; ฐิตินัย, 2554)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูปที่

2.7

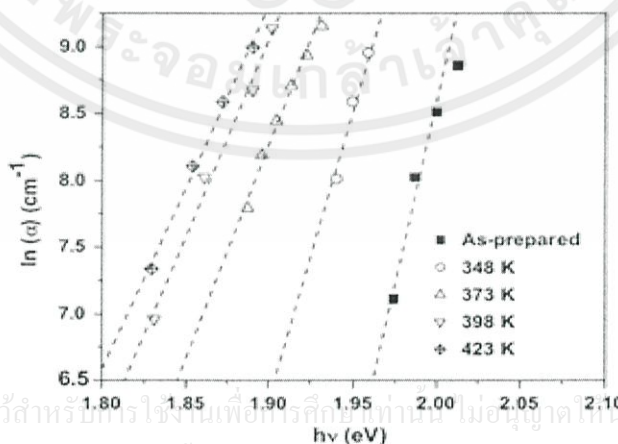
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออบัค (urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E-E_0)}{K_B T}\right] \tag{2.3}$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน K_B คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ σ คือความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.3) นี้บอกเป็นนัยๆว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน(หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลาดส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆจะลู่เข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่าจุดคู่รวม

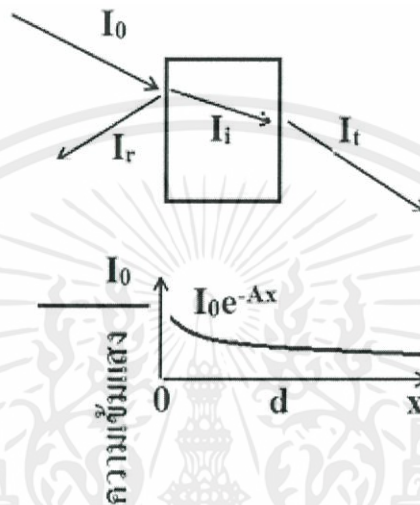


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.8 กราฟระหว่าง $\ln\alpha$ กับพลังงาน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

2.6 การส่งผ่านแสง (ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2553; ฐิตินัย, 2554; Kittel, 2005)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูป



รูปที่ 2.9 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง เมื่อ A คือ α สมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

วิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

สมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) มีนิยามดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.3.1)$$

สมประสิทธิ์การสะท้อน

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

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่และมีค่าน้อยมากดังนั้นสมการจะกลายเป็น

$$T \approx e^{-\alpha d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่อ (1) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.3.2)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรงคือ

$$(\alpha h)^2 = A(h - E_g) \quad (2.3.3)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียงคือ

$$(\alpha h)^{1/2} = B(h - E_g) \quad (2.3.4)$$

2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2553; ฐิตินัย, 2554; Cullity, 1956; Ruyun, 1975)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการการทำงานคือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจงรายละเอียดคำภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะ พร่ามัวขาดรายละเอียด ในปีพ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์สนใจและเริ่มนิยมใช้ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

หลักการการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ช่วง 1-40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวโฟกัสภาพ อิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron:SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ คาโทด (cathode ray tube:CRT)

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:InSe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2553; ฐิตินัย, 2554)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เจือด้วยสารประกอบ InSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ CdSe 0.285g และ InSe 0.015g
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
3. ครกอาเกต
4. เครื่องอัดไฮโดรลิกที่ใช้สำหรับอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เตาอบสาร
6. ที่ตักสาร



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9x9 ตารางมิลลิเมตร
2. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคืบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปลอกประจูด
 - 9.3 อะซีโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เจือด้วยสารประกอบ InSe

InSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบและติดตั้งโดย ดร.ชาญวิทย์ จิตรยุทธการ
2. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe:InSe น้ำหนักประมาณ 3 กรัม
3. เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
4. แผ่นกระจกสไลด์
5. อะซีโตน
6. ครกอาเกต
7. เครื่องอัดไฮโดรลิกที่ใช้สำหรับอัดเม็ดสารตั้งต้น
8. เตาเผาสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

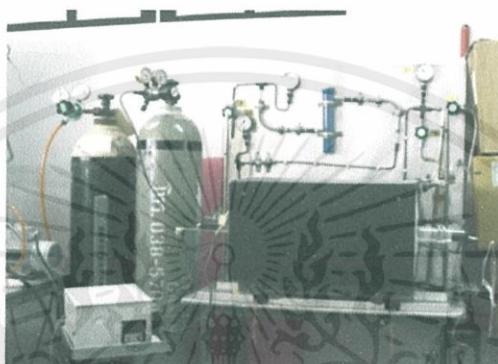
3.1.4 วิธีการแอนนีส

1. เปิดวาล์วที่ถังก๊าซไนโตรเจนก่อนให้วาล์วละเอียดอยู่ที่ 100 กิโลปาสกาล ตรวจสอบวาล์วหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ให้อยู่ในตำแหน่งปิด (บิดไปทางขวามือ)
2. เสียบปลั๊กไฟปั๊มดูดอากาศเพื่อให้ปั๊มทำงาน ตรวจสอบสายยางระบายอากาศออกสู่ภายนอกห้อง จากนั้นจึงค่อยๆ เปิดวาล์วหมายเลข 4 ซ้ำๆ เพื่อทำการดูดอากาศออก แล้วจึงค่อยปิดวาล์วหมายเลข 4
3. เปิดวาล์วหมายเลข 1 ซ้ำๆ โดยให้สเกลใน G1 ไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Psi) (ไม่เช่นนั้นหลอดชิลิกาเจลจะระเบิดได้) ให้เปิดวาล์วหมายเลข 2 ต่อเนื่องทำให้สเกลใน G3 จะเพิ่มขึ้น
4. พยายามปรับวาล์วหมายเลข 1 ให้ก๊าซไนโตรเจนไหลช้าๆ โดยดูจากสเกล G3 จะเพิ่มขึ้นจนเต็มสเกล แล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2
5. ทำการดูดอากาศออกจากท่อแก้วโดยการเปิดวาล์วหมายเลข 4 จนสเกล G3 ลดลงต่ำสุด
6. ปิดวาล์วหมายเลข 4
7. เริ่มทำ 3, 4 และ 5 ซ้ำตามลำดับ อีก 2 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มี ก๊าซออกซิเจนเหลืออยู่
8. ปิดวาล์วหมายเลข 4
9. เปิดวาล์วหมายเลข 1 และ 2 ให้ก๊าซไหลเข้าในท่อแก้วจนความดันในสเกล G3 เพิ่มขึ้น เกือบเป็นศูนย์ แล้วจึงเปิดวาล์วหมายเลข 3 ปล่อยให้ฟองอากาศผุดขึ้นมาอย่างช้าๆ ส่วนสเกล G1 ต้องไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Psi) ซึ่งจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป
10. คอยตรวจสอบวาล์วหมายเลข 1 อย่างสม่ำเสมอเพื่อไม่ให้สเกล G1 เพิ่มขึ้นสูงเกินไป หรือ ลดต่ำลงจนเกินไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาตามต้องการ เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิของเตาให้คงที่ จะต้องใช้เซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) อดที่หัวเตาและท้ายเตา เพื่อป้องกันการไหลของอากาศเย็นเข้าไปในเตา
11. กดปุ่มโหมด ให้ไฟขึ้นที่ปุ่มโหมด แล้วกดปุ่มขึ้นลงเพื่อทำการปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการ
12. ใช้เวลาแอนนีส 30 นาที เมื่อครบแล้วให้ปิดสวิทช์ของแหล่งจ่ายไฟ แล้วเอาเซรามิกไฟเบอร์ออก (ในขั้นตอนนี้ควรสวมถุงมือและหน้ากาก เพื่อความปลอดภัยจากเซรามิกไฟเบอร์)
13. เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ให้ทำการปิดวาล์วทุกตัวและเปิดจุกที่หัวท้ายเตาเอาสารตัวอย่างออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำแนะนำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการจึงเริ่มทำการจับเวลา 20 นาทีซึ่งเป็นเวลาที่จะใช้ในการแอนนีสล
15. ปิดสวิทช์ของแบริแอคไปที่เลขศูนย์
16. ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ ในการแอนนีสลมีค่าเท่ากับ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ต้องรอให้อุณหภูมิลดลงถึง 100 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถปิดวาล์วที่บอร์ดทั้งหมด ปิดวาล์วละเอียด (สีดำ) และวาล์วหยาบ
17. จากนั้นรอให้เตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมihห้อง นำสารตัวอย่างออก



รูปที่ 3.2 ระบบเตาแอนนีสลที่สามารถใช้งานได้ถึง 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

3.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe: InSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิศย์, 2553; ฐิตินัย, 2554)

3.2.1 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:InSe จากผงผลึกของสารตั้งต้น CdSe ที่เจือด้วย In₂Se₃ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe 0.95 โมล ของ 3 กรัม เท่ากับ 0.286g และชั่งสารประกอบ InSe 0.05 โมล ของ 3 g คือ 0.014 g
2. นำผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ InSe ที่ชั่งเสร็จแล้วมาบดรวมกันในครกเอกเทเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อบดแล้วนำไปอบในตู้อบสาร ด้วยอุณหภูมิ 150 °C นาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงปิดเตารอจนเตาเย็นลงจึงนำสารออกมาจากเตา จากนั้นจึงนำไปประเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศได้

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อเตรียมสาร CdSe:InSe จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เราจะใช้ CdSe 0.95 โมล รวมกับ InSe 0.05 โมล ให้ได้ CdSe:InSe จำนวน 3 กรัม มีวิธีในการคำนวณดังนี้

จากสมการ



$$x=0.05$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ CdSe} &= 112.40 + 78.96 \\ &= 191.36 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ In}_2\text{Se}_3 &= 2 \times 114.82 + 3 \times 78.96 \\ &= 466.52 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ Cd}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Se} &= (0.95)(112.41) + (0.05)(114.82) + 78.96 \\ &= 106.78 + 5.741 + 78.96 \\ &= 191.4905 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\text{ต้องการใช้ Cd}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Se} = 0.3 \text{ กรัม}$$



Cd_{0.95}In_{0.05}Se ในหนึ่งโมลจะมีมวลเท่ากับ 191.4905 g/mol ซึ่งจะต้องใช้ CdSe จำนวน = (0.95)(191.37) กรัม

$$\text{ถ้าต้องการ Cd}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Se} = 0.3 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ (0.95)(191.37)(0.3) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จะต้องใช้ CdSe} = \frac{(0.95)(191.37)(0.3)}{191.4905}$$

$$= 0.2848 \text{ กรัม}$$

$$\text{และจะต้องใช้ } \text{In}_2\text{Se}_3 = \frac{(0.05)(466.52)(0.3)}{191.4905}$$

$$= 0.036 \text{ กรัม}$$

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25x75 ตารางมิลลิเมตรไปแช่ในน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที และนำไปไว้ในเครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาทีและนำไปไว้ในเครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาทีและนำไปไว้ในเครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็กขนาด 9x9 ตารางมิลลิเมตร
7. นำสไลด์ล้างด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที โดยนำบีกเกอร์ไปใส่ไว้ในเครื่องล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. จากนั้นนำมาเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากข้อ 8 ไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
10. รอกันเตาเย็นจึงนำสไลด์มาใช้ได้

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CdSe:In (5at%) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น

กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดระบบระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่น ด้วยอะซีโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบระเหยด้วยความร้อนภายในสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ชั่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ In_2Se_3 ให้ได้ 0.3 กรัม และอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาบรรจุลงบนภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้ว วางลงบนแผ่นหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอะลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการหลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันช่วง 5×10^{-3} ถึง 2×10^{-5} มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสาร โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตซ์ข้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่สัปดาห์ประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100 ถึง 130 แอมแปร์ จนได้ความหนาของฟิล์มประมาณ 500 นาโนเมตรซึ่งอ่านได้จากเครื่องวัดความหนา Leybold TM 6 รวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาตามต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดแบริเอค
9. ให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลง แล้วปิดปั๊มเทอร์โบจากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศนำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีรอเตาเย็นจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่มีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโคโอดของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

3.2.4 วิธีการวัดความต้านทานของฟิล์มบาง

1. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและที่มีการแอนนีสที่ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที นำมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินแต่มลงผิวหน้าของฟิล์มบางจำนวน 2 เส้นขนานกัน เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า
2. ทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปที่กาวเงินทั้ง 2 เส้นจากนั้นวัดค่ากระแสที่แหล่งจ่ายไฟตรงให้กับวงจร
3. นำแผ่นชิ้นงานใส่กล่องโลหะเพื่อลดสัญญาณรบกวน แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วทั้งสอง พร้อมทั้งบันทึกค่ากระแสที่ไหลภายในวงจร กระแสที่วัดได้อยู่ในช่วง 10^{-7} - 10^{-8} แอมแปร์
4. เพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร พร้อมทั้งบันทึกค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงกับกระแส โดยทำการวัดค่าความต้านทานประมาณ 10 ค่า
5. ฉายแสงด้วยหลอดไฟชนิดฮาโลเจน ELH ขนาด 120 โวลต์ 300 วัตต์ ที่ค่าความเข้มแสงประมาณ 950 ลักซ์ และทำการวัดค่าความต่างศักย์กับกระแส
6. ทำการเขียนกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า
7. จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้าสามารถหาค่าความต้านทานแผ่นได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_s = \frac{V(W)}{I(L)} \quad (3.1)$$

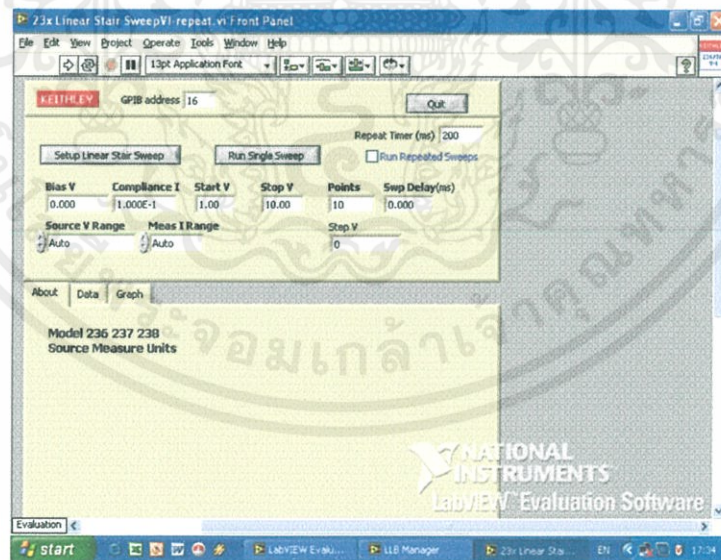
โดยที่ W คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

$\frac{V}{I}$ คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานแผ่น

- อิเล็กทรอนิกส์ Keithley รุ่น 236
- กล่องอคูมิเนียม
- หลอดฮาโลเจนชนิด ELH (120 V, 300 W)



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In (5%) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2553; ฐิตินัย, 2554)

3.3.1 การศึกษาเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

นำตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมจากการระเหยด้วยความร้อนภายใต้ระบบสุญญากาศไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนทางรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

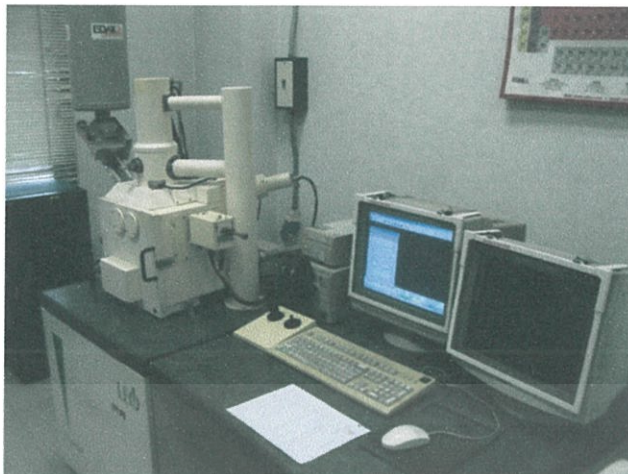


รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.3.2 การศึกษาเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง ที่เตรียมได้จากเงื่อนไขทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

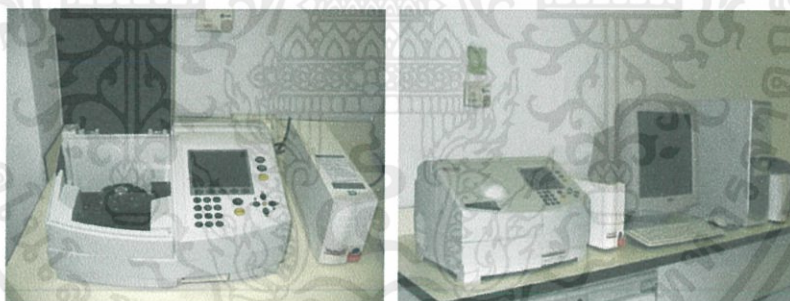
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมได้จากเงื่อนไขทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ (UV-VIS) ของ thermo electron corporation (He λ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1,000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ions α

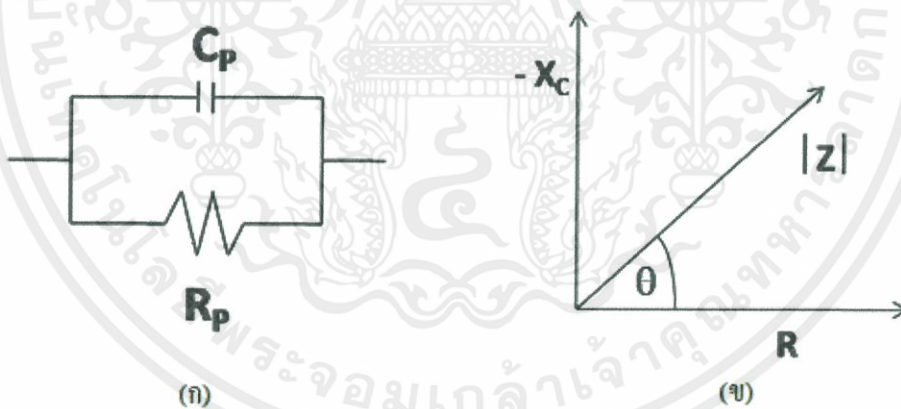
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และ อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

3.3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z) ของสารกึ่งตัวนำ CdS คือ ความต้านทาน R_p ต่อขนานกับความจุ C_p ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R

ก. วงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน

ข. ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจินตภาพแห่งความจุ (capacitive reactance, X_C) คือ

$$X_C = \frac{1}{\omega C_p} \quad (3.1)$$

มุมเฟส θ จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan \theta = \frac{|X_C|}{R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.2)$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor, D) คือ

$$D = \tan \theta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.3)$$

จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้วแฟกเตอร์สูญเสียจะมีค่าลดลง และแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor, Q) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega R_p C_p \quad (3.4)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ $C_p - D$, $C_p - Q$, $C_p - G$ และ $C_p - R_p$ โดยที่ G คือ ความนำไฟฟ้า ซึ่ง

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (3.5)$$

โดยทั่วไปที่ความถี่ใดๆค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน Z^* จะเป็นดังสมการ

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (3.6)$$

และ

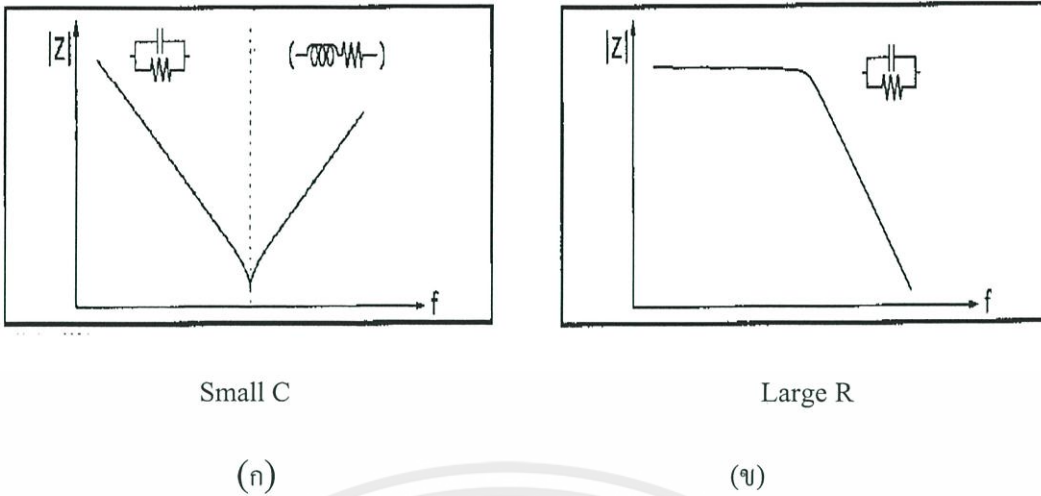
$$D = \frac{Z'}{Z''} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.8)$$

$$Z'' = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ ความถี่ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.10
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

- ก. ในกรณีที่ความจุ (C) มีค่าต่ำ
- ข. ในกรณีที่ความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเซอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \quad (3.10)$$

เมื่อ n คือเลขยกกำลัง

จำนวนจริง (Z') และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

และ

$$Z'' = \frac{-\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

ซึ่งค่า R_p จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน Z' ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ ส่วนค่าความจุ C_p จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติ ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมคือ $Z' = -Z''$ ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ $\frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$ จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$C_p = \frac{1}{\omega R_p} \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time , τ) จะคำนวณได้จากความถี่สูงสุดของครึ่งวงกลม

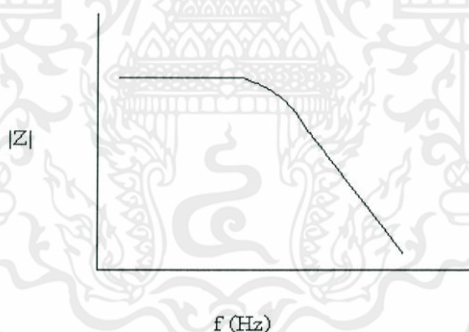
$$\tau = \frac{1}{\omega_{\max}} = C_p R_p$$

หรือ $\omega_{\max} C_p R_p = 1$ (3.12)

จากค่า Z' และ Z'' จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้ว่า

$$|z| = \sqrt{(z')^2 + (z'')^2} \quad (3.13)$$

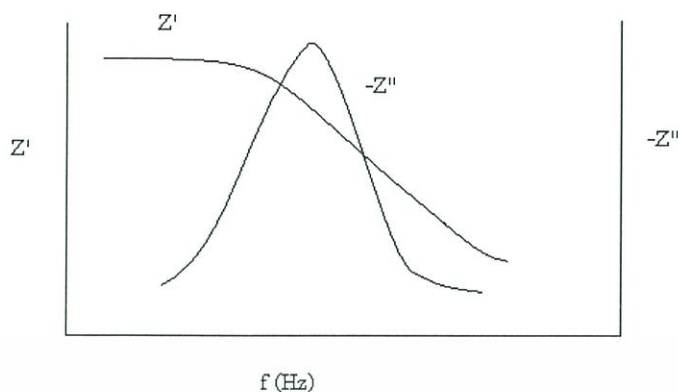
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f จะเขียนได้ดังรูปที่ 3.6



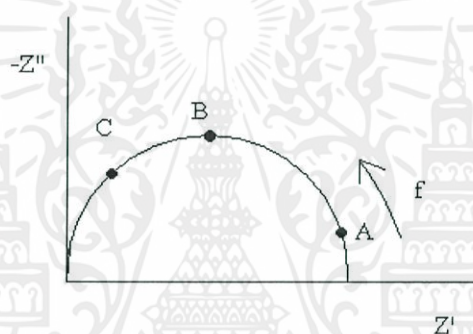
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)

แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f) และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f)

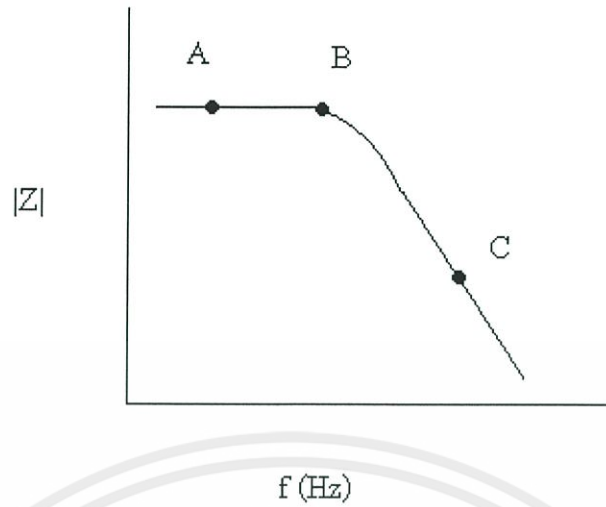


รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$)

- ที่ความถี่ต่ำ (ที่บริเวณจุด A) Z' จะมีค่ามาก ส่วน $-Z''$ จะมีค่าน้อย
- ที่ความถี่ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B) Z' จะมีค่าลดลง ส่วน $-Z''$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า $Z' = -Z''$
- ที่ความถี่สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง Z' และ $-Z''$ จะมีค่าลดลงอีก

และถ้านำมาเขียนกราฟ $|Z|$ กับ f จะได้ดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

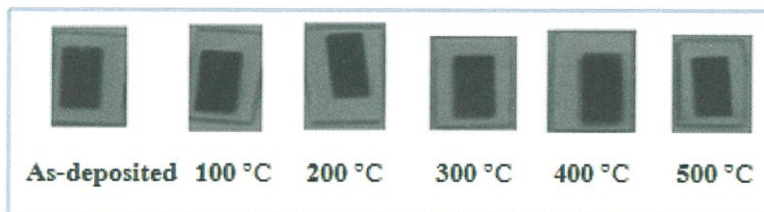
ผลการวิจัย และ อภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้จะเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นสไลด์กระจกและที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ส่วนสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส จากนั้นจะทำการทดลองวิเคราะห์ผลการทดลองอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี โดยใช้แบบจำลองของวงจรที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานกับความต้านทานชั้น (shunt resistance) โดยมีความต้านทานภายนอกอีกตัวหนึ่งมาทำหน้าที่เป็นความต้านทานอนุกรม (series resistance)

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ มีสีดำนมวาว สะท้อนแสง และติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดีแม้ว่าจะไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนา 500 นาโนเมตร ไม่มีรูพรุนให้สังเกตได้ ฟิล์มบางที่เตรียมได้ดังแสดงในรูป 4.1 ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In หลังจากนำไปแอลนีลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ผิวหน้าจะไม่ค่อยเรียบ มีความมันวาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



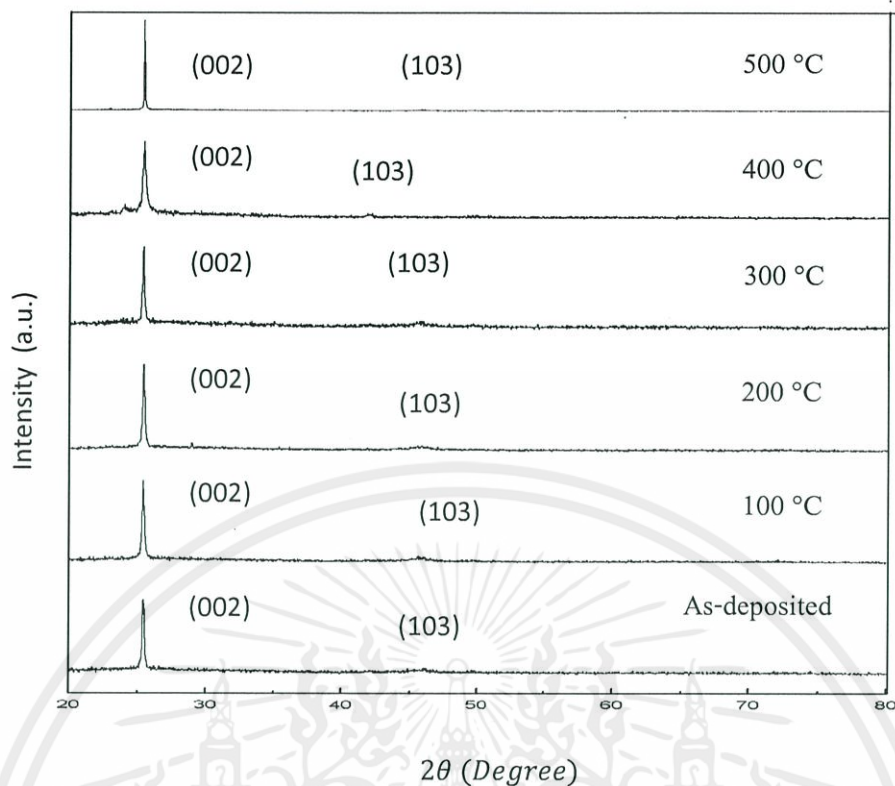
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่แผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.2 ผลการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

การตรวจสอบ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าพีคของความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ปรากฏเด่นชัดที่สุดที่มุม $2\theta=25.425$ องศา ส่วนพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มขึ้นน้อยกว่าจะปรากฏที่มุม $2\theta=45.950$ องศา ตามลำดับ ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องดีกับ ระนาบ (002), และ (103) ของโครงผลึกแบบเวิร์ทไซด์ตามลำดับ ดังปรากฏในรูป 4.2 แต่เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In จากนั้นนำไปเข้าเตาแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส พบว่าพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (002) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

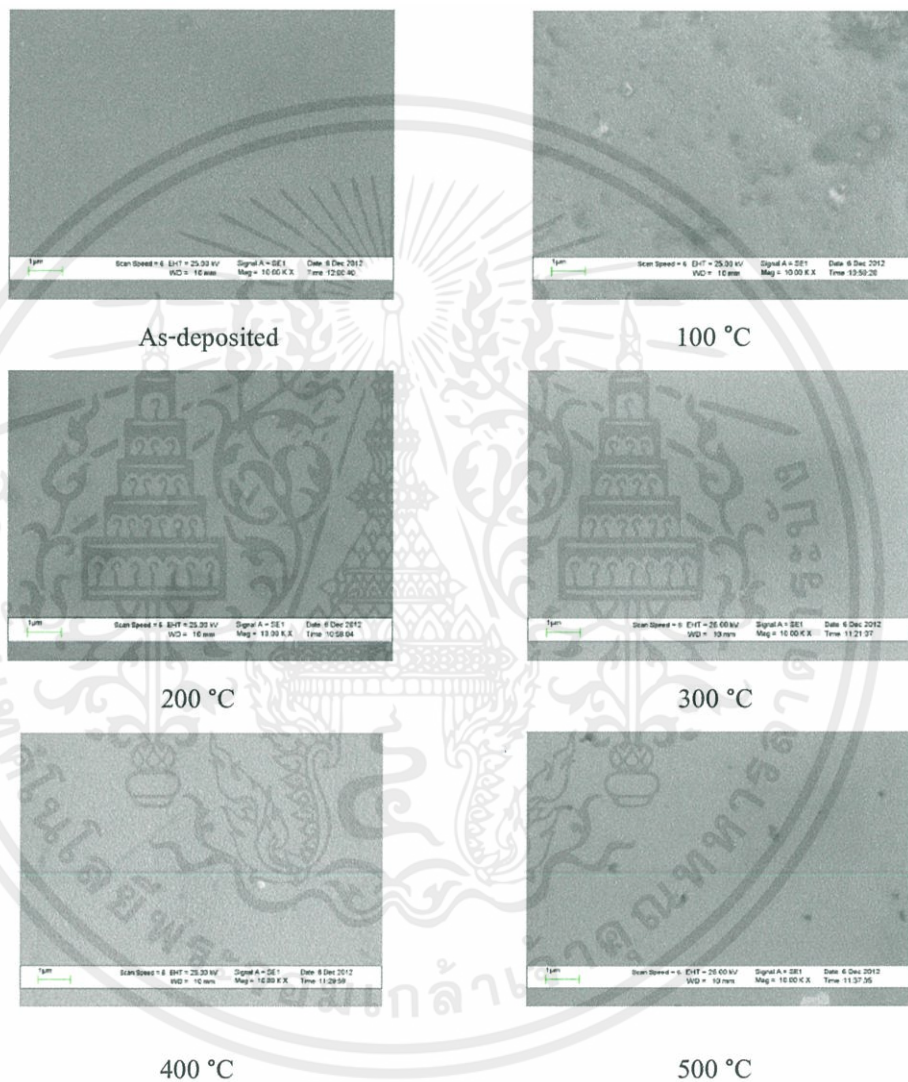
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ

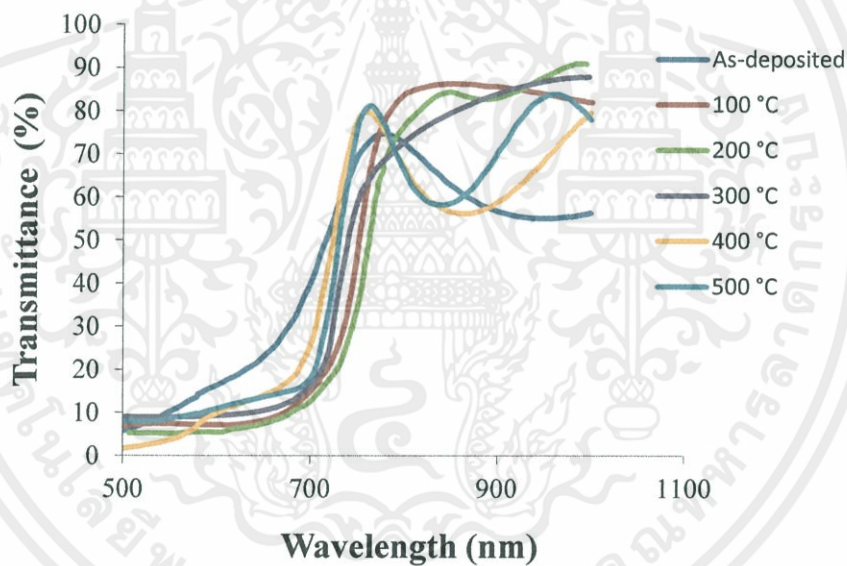


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

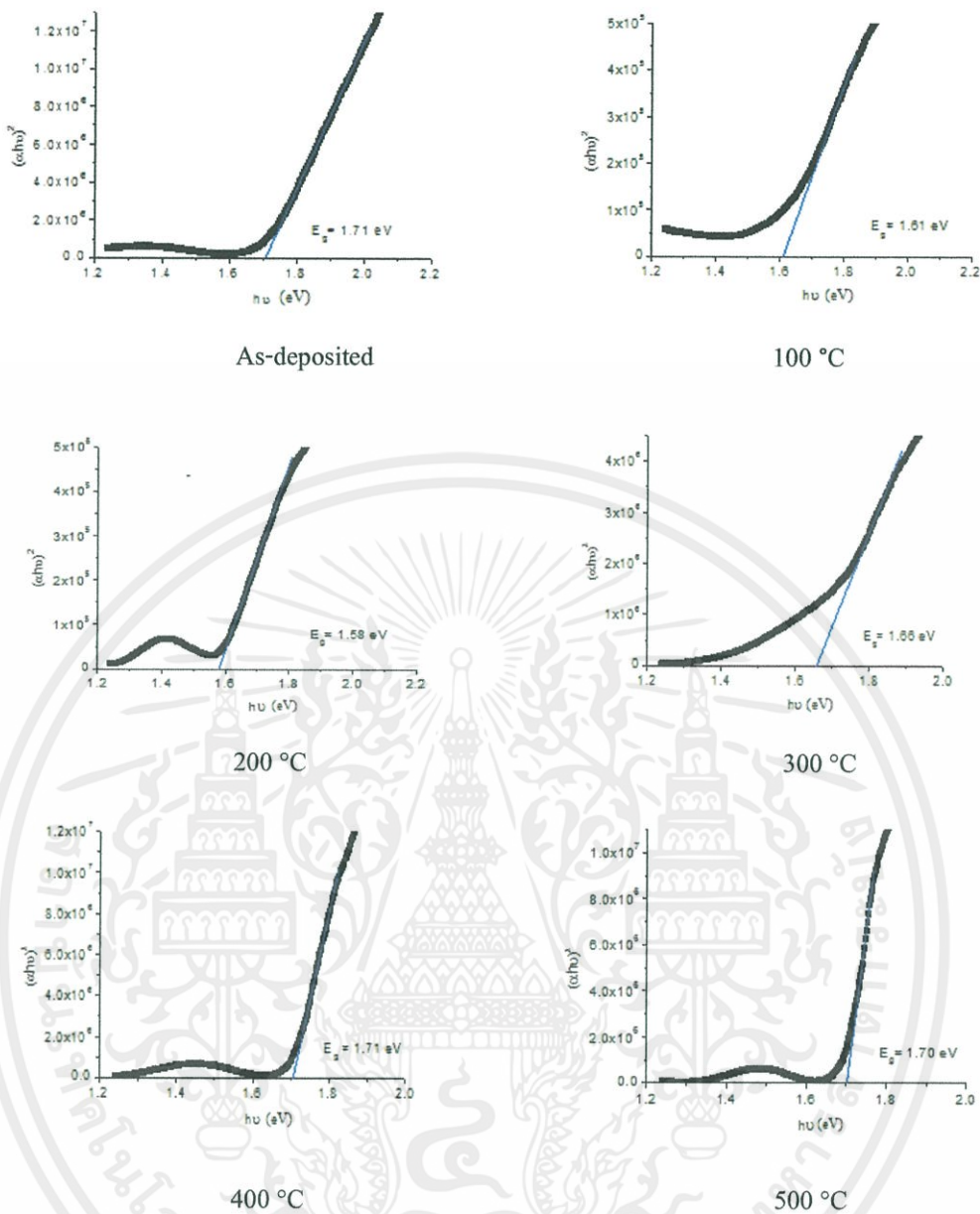
4.4 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ดังแสดงในรูป 4.4 ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีก จะปรากฏในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



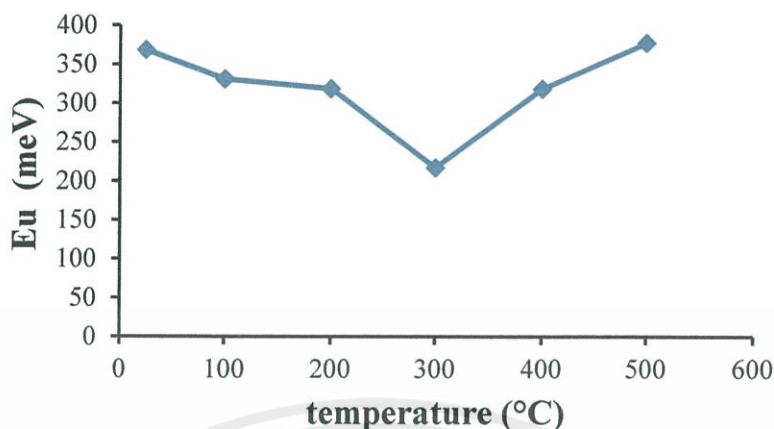
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าช่องว่างแถบพลังงานและขนาดของส่วนหางของแถบพลังงาน ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

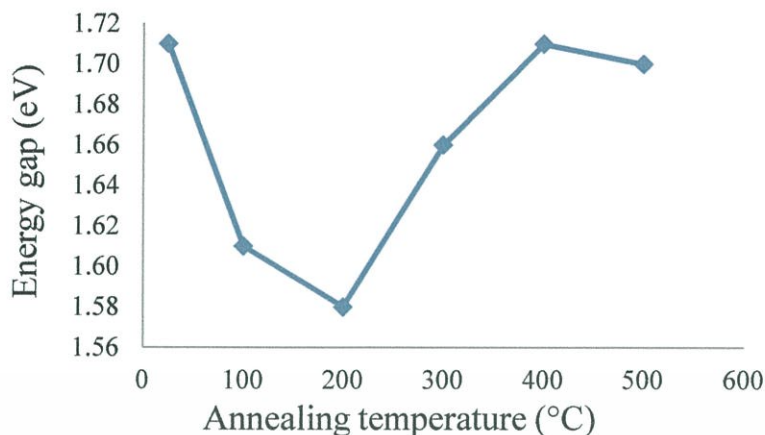
Annealing Temperature (°C)	E_g (eV)	E_u (meV)
As-deposited	1.71	368.43
100	1.61	331.13
200	1.58	318.66
300	1.66	217.27
400	1.71	318.66
500	1.70	377.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนหางของแถบพลังงาน (Eu) กับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับอุณหภูมิแอนนิงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ เมื่อมีการแอนนิงภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

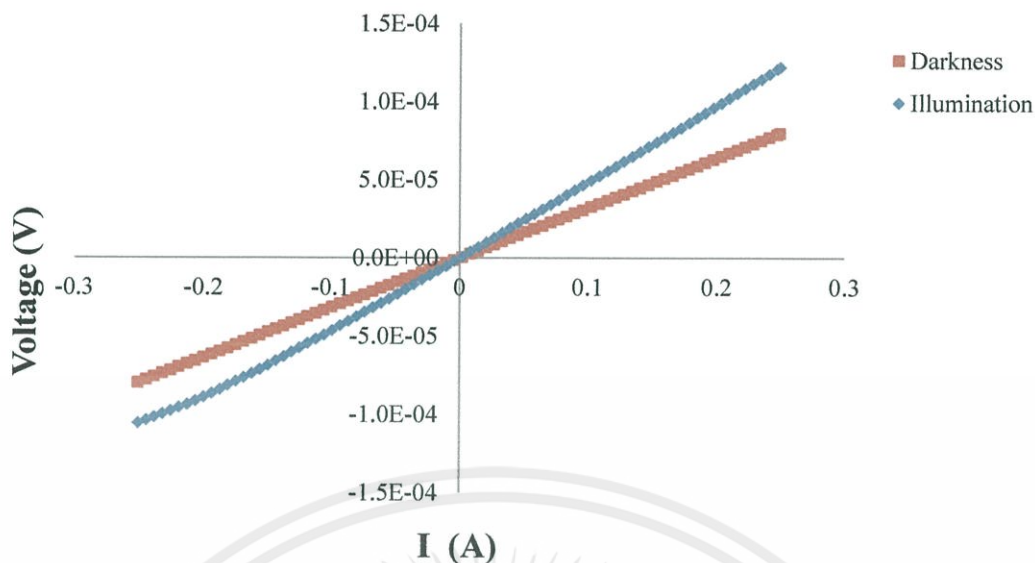
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานแผ่น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe: In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

จากตารางที่ 4.2 ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In วัดที่อุณหภูมิห้องทั้งขณะที่ไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสง จากหลอดไฟ ELH พบว่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลง ขณะที่มีการฉายแสง แสดงว่า แสงทำให้พาหะอิสระเพิ่มขึ้น จึงนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นความต้านทานแผ่นขณะไม่มีการฉายแสงและการฉายแสงมีแนวโน้มลดลง และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนัล เท่ากับ 300 องศาเซลเซียส จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสดังปรากฏในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



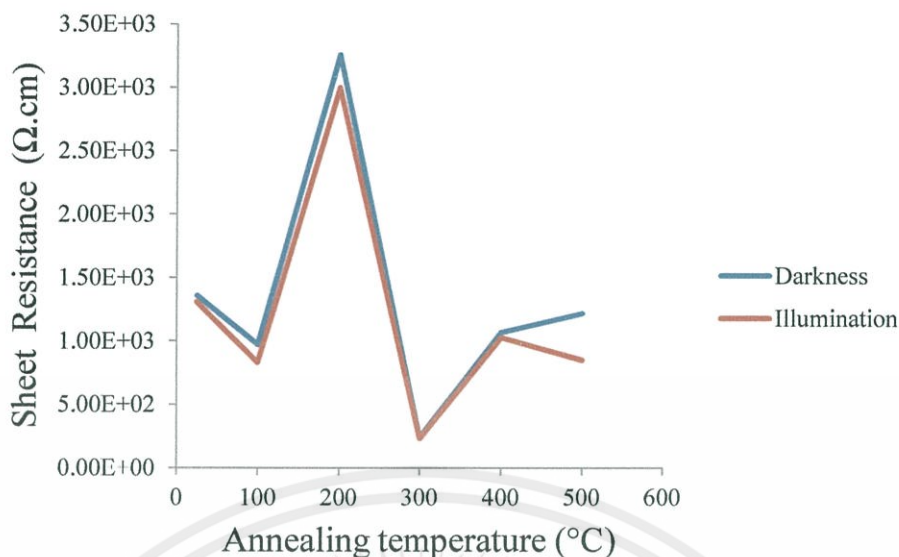
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดทั้งในกรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านแผ่นของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

Annealing temperature (°C)	Sheet resistance (Ω .cm)	
	Darkness	illumination
As-deposited	1.36×10^3	1.31×10^3
100	9.72×10^2	8.32×10^2
200	3.26×10^3	3.00×10^3
300	2.40×10^2	2.33×10^2
400	1.07×10^3	1.03×10^3
500	1.22×10^3	8.50×10^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนัล เมื่อทำการวัดทั้งในกรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

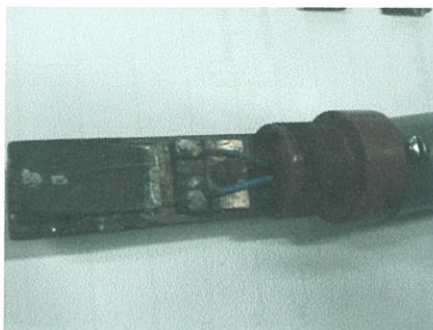
4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิในช่วง 24 ถึง 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe นี้จะเคลือบอยู่บนฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่าง ส่วนขั้วไฟฟ้าอีกข้างหนึ่งจะเป็นกาวเงินที่มีทำเป็นรูปวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส จะต้องติดตั้งอยู่บนแผ่นยึดสารตัวอย่างดังปรากฏในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ มีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การติดตั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที บนแท่นยึดสารตัวอย่างเพื่อทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ในช่วงโดยใช้ความถี่ 100 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์

ดังปรากฏในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และค่าความจุไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของการวัดเพิ่มขึ้น แสดงว่าพลังงานความร้อนช่วยกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเพิ่มขึ้นในเนื้อของฟิล์มบาง ส่วนสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นตามความถี่อีกด้วย ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของ จอนเซอร์ (Dukhel , 2006) ดังนี้ คือ

$$\sigma = A\omega^s \quad (4.1)$$

เมื่อ s คือเลขยกกำลัง และ A คือค่าคงที่ ถ้าพิจารณาจากลอการิทึมธรรมชาติของสภาพนำไฟฟ้า (ดังรูปที่ 4.11) จะได้ว่า

$$\ln\sigma = s\ln\omega + \ln A \quad (4.2)$$

จะเห็นว่าเลขยกกำลัง s คำนวณที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่ง s จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของ จอนเซอร์ (Dukhel , 2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $s = 1 - \frac{6kT}{W_M}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น (4.3) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ W_M คือค่าสูงสุดของความสูงของกำแพงศักย์ของกลไกการกระโดดข้ามกำแพงศักย์ของพาหะ (correlated barrier hopping mechanism) ซึ่งมีค่าสูงสุดไม่เกิดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การเคลื่อนที่ของพาหะจะกระโดดการกับดักประจุจุดหนึ่งไปยังกับดักประจุอีกจุดหนึ่ง ความสูงของกำแพงศักย์ของการกระโดดจะสัมพันธ์กับ W_M ดังนี้คือ

$$W_M = \frac{2e^2}{\pi\epsilon_S R} + W \quad (4.4)$$

โดยที่ R คือระยะห่างของกับดักประจุ, ϵ_S คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ (permittivity of semiconductor), ส่วน τ_0 คือช่วงเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) มีค่าประมาณ 10^{-13} วินาที สำหรับความสัมพันธ์ค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่วัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส จะแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้ว (Z') จะมีค่าลดลงซึ่งจะแสดงดังสมการ

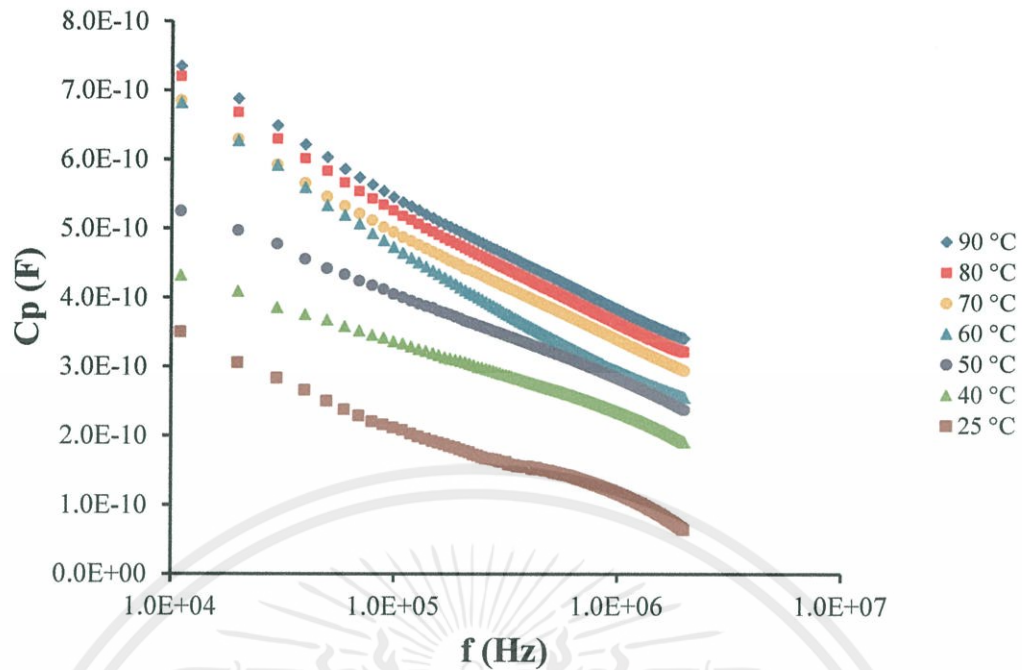
$$Z' = \frac{R_p}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4.5)$$

และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้ว R_p จะลดลง ส่งผลให้ Z' มีค่าลดลงด้วย ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z'') กับความถี่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่วัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส จะแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะอธิบายด้วยสมการ

$$Z'' = \frac{R_p \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4.6)$$

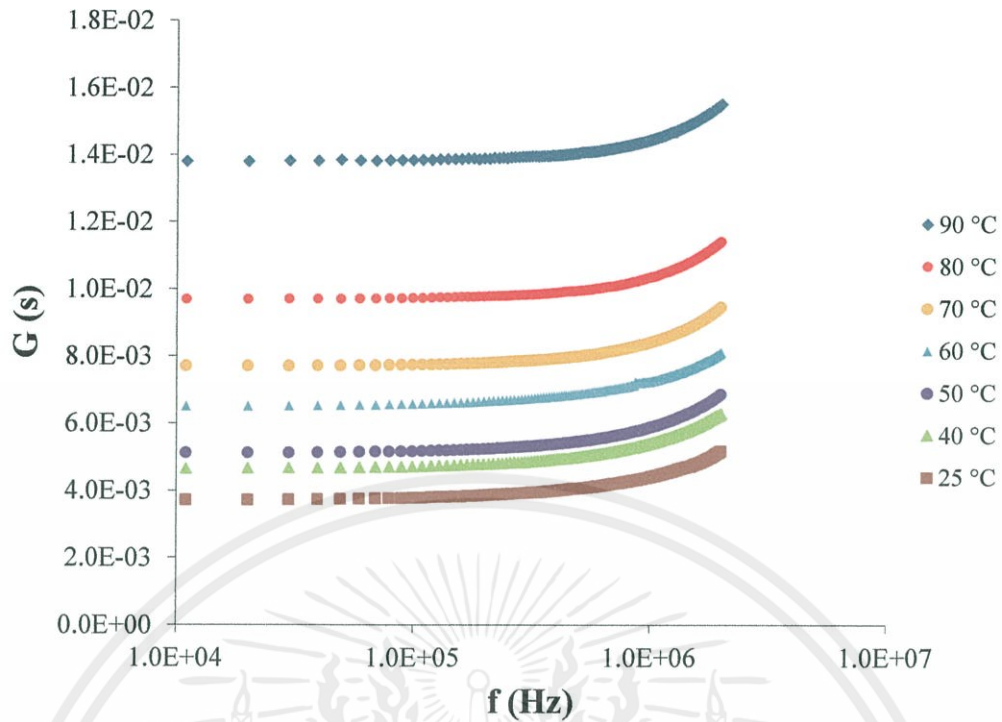
ความถี่ที่พิกของกราฟในรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะแสดงถึงความถี่ผ่อนคลายของวงจรสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



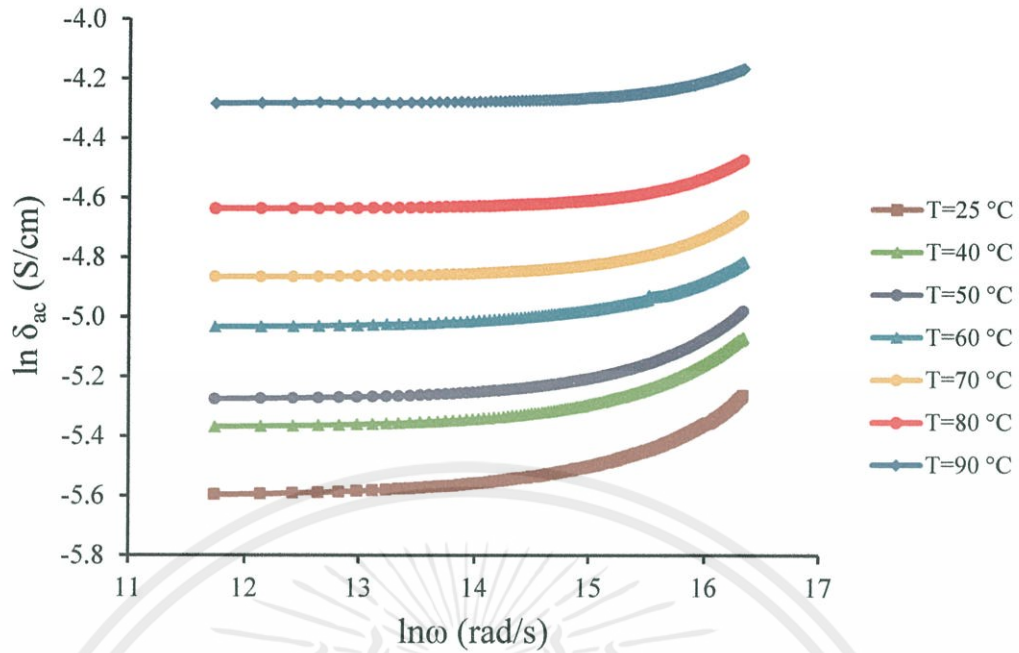
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



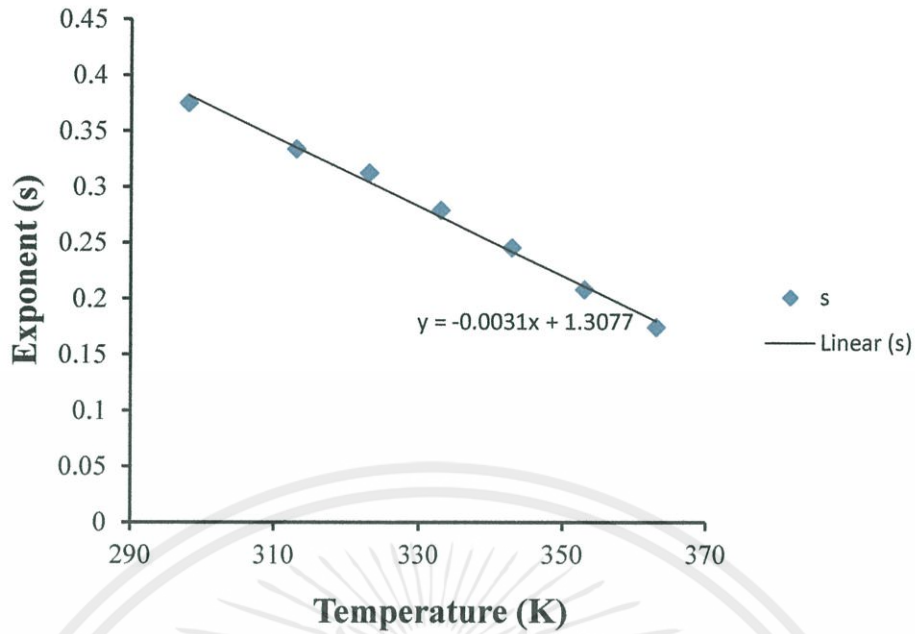
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้า โปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma_{ac}$ กับ $\ln \omega$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

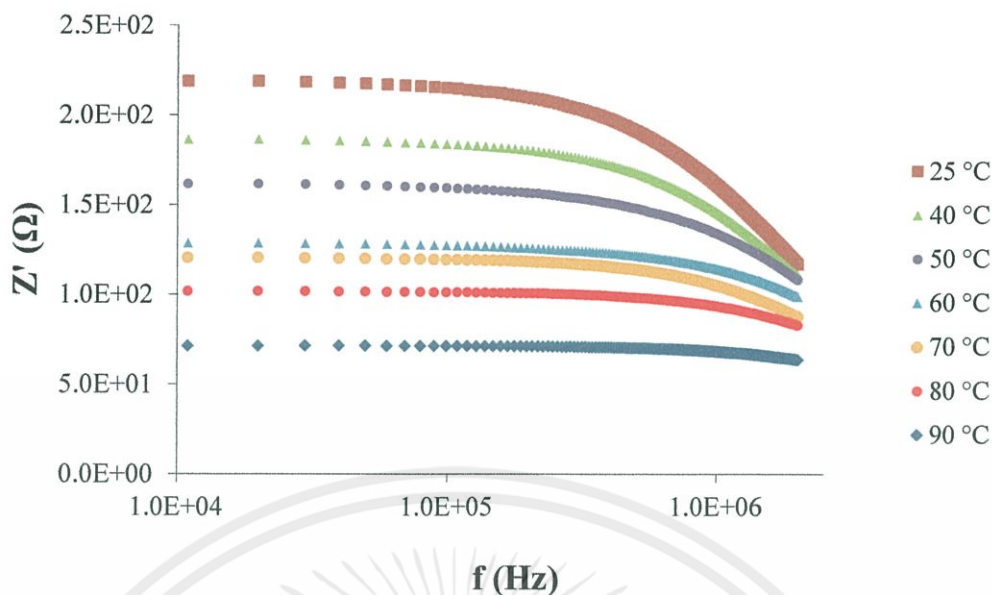
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเลขยกกำลัง S กับอุณหภูมิที่ใช้วัดที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

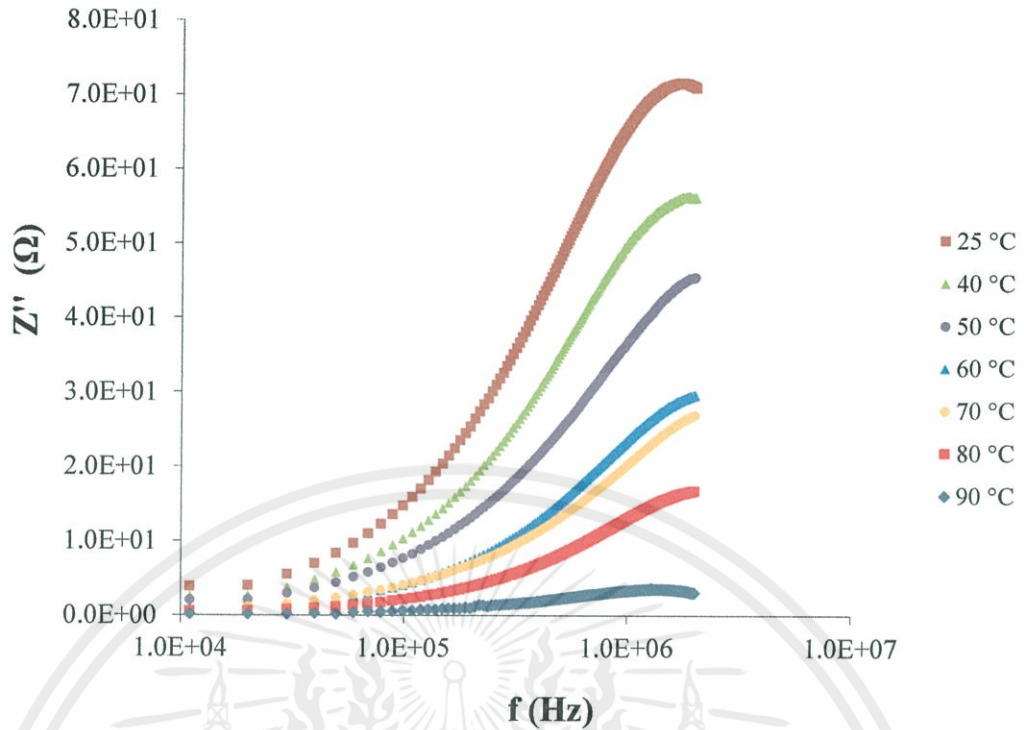
จากสมการที่ 4.3 จะได้ว่า ความชันคือ $\frac{6k}{W_m}$ ซึ่งจากการทดลองความชันของรูปที่ 4.16 มีค่าเท่ากับ 0.003 ดังนั้น W_m จะมีค่าเท่ากับ 172.5 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



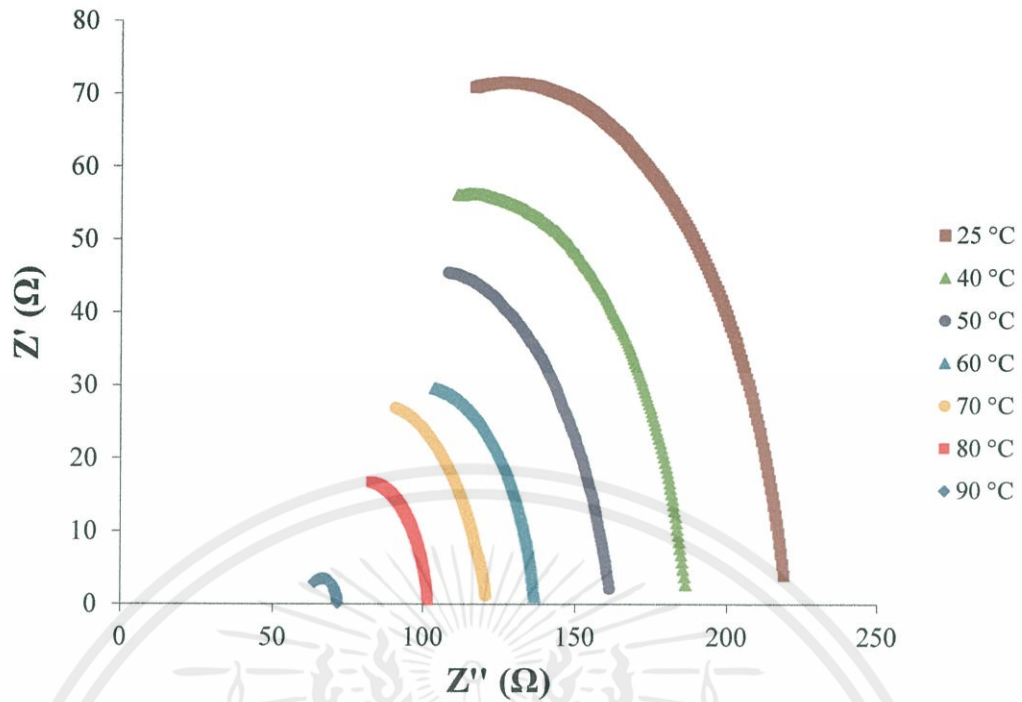
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe : In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



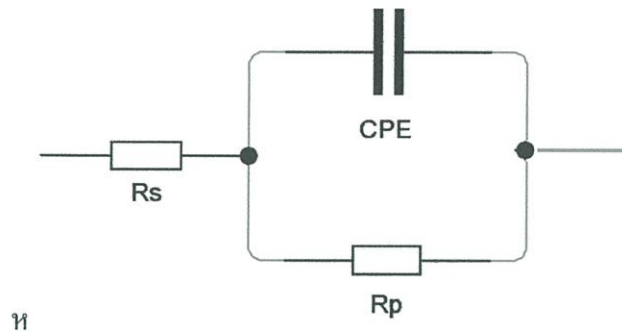
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของ ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการ แอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศา เซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

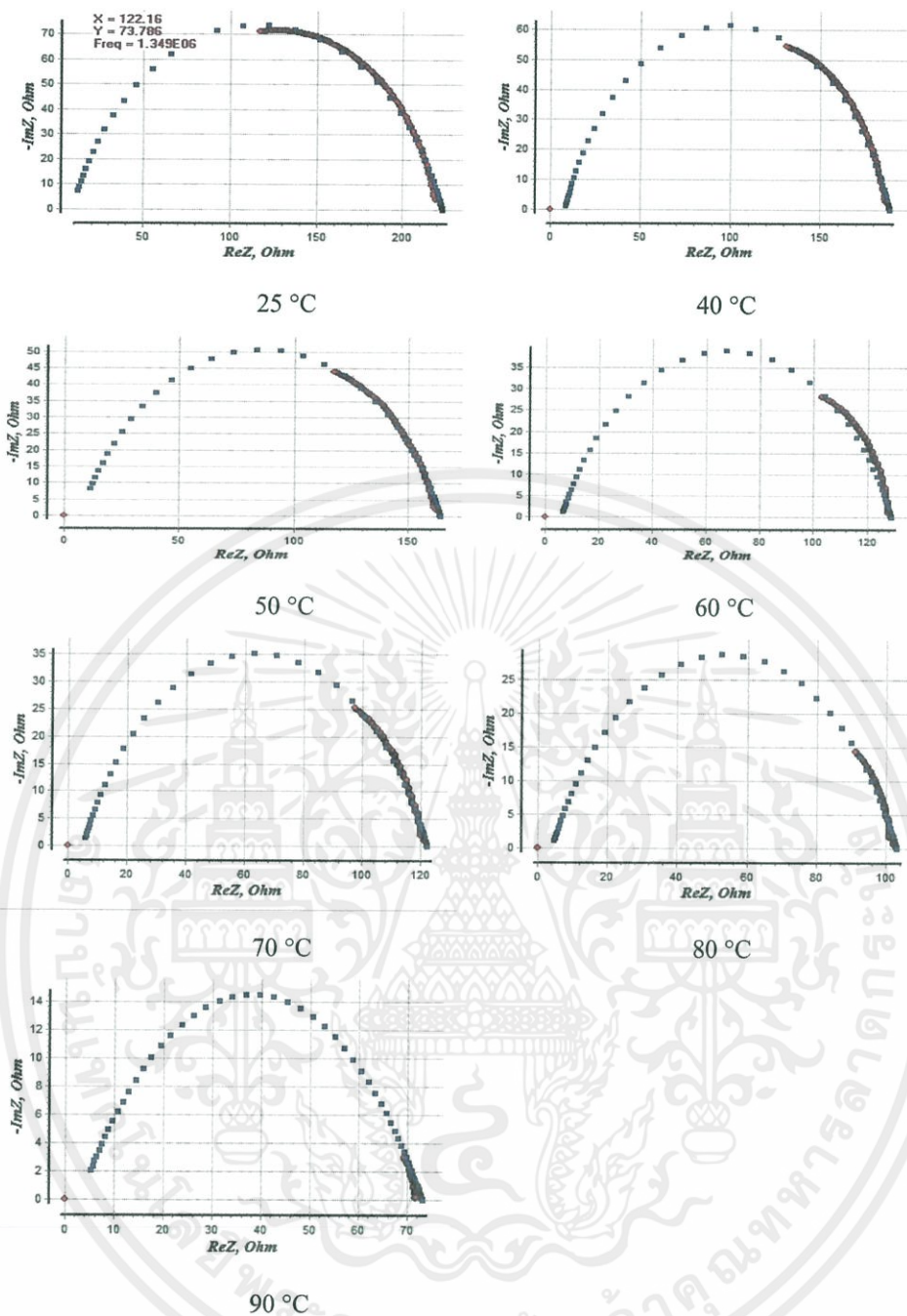


รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ศึกษาการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In จะแสดงในรูปแบบที่ 4.17-4.23 และ พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการจำลองจะปรากฏในตารางที่ 4.4

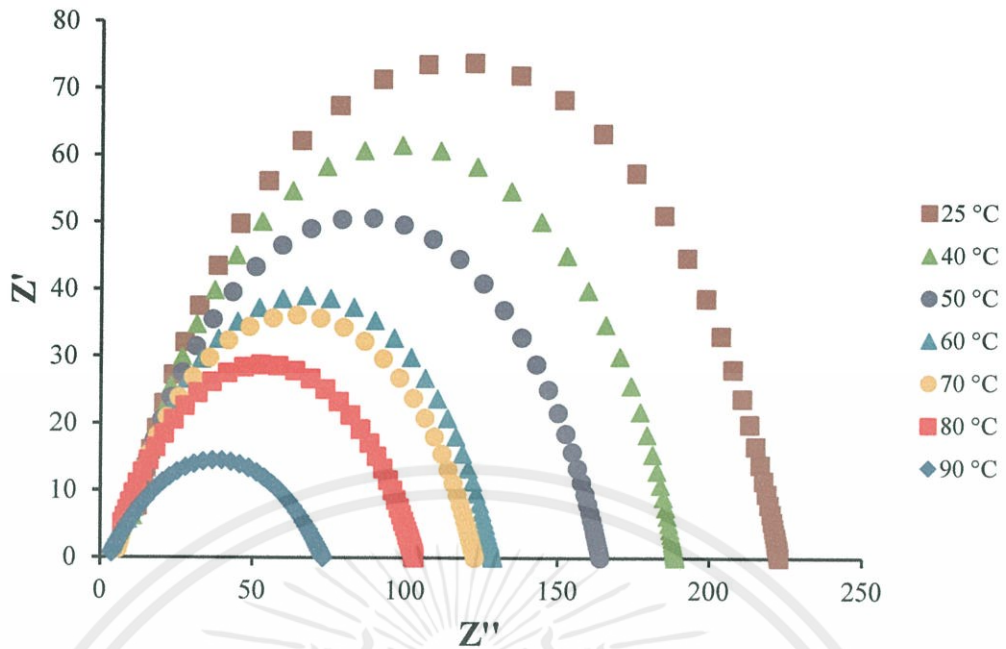


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่าจะพิมพ์ขึ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



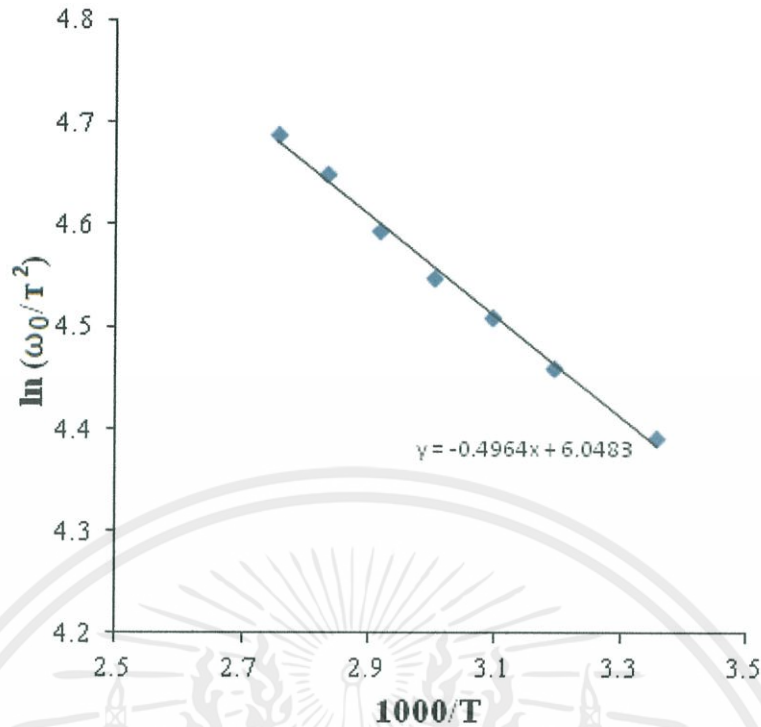
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนีลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโคปี โดยใช้ความถี่ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe: In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

Temperature (°C)	Parameters							
	R_s (Ω)	R_p (Ω)	P ($S \cdot s^{-n}$)	n	$C_p = \frac{(PR_p)^{1/n}}{R_p}$ (F)	f_{max} (Hz)	ω_{max} (s^{-1})	$\omega_{max}\tau$
25	9	214	2.00×10^{-8}	0.77	4.98×10^{-10}	1.34×10^6	8.41×10^5	0.897
40	8	181	3.00×10^{-8}	0.76	6.52×10^{-10}	1.35×10^6	8.47×10^6	1.001
50	7	157	5.25×10^{-8}	0.73	6.92×10^{-10}	1.73×10^6	1.08×10^6	1.180
60	6	123	7.00×10^{-8}	0.72	7.51×10^{-10}	1.75×10^6	1.09×10^7	1.015
70	5	118	1.00×10^{-7}	0.70	7.73×10^{-10}	1.81×10^6	1.13×10^7	1.036
80	4	99	2.00×10^{-7}	0.67	9.65×10^{-10}	1.91×10^6	1.19×10^7	1.146
90	3	70	4.00×10^{-6}	0.50	1.12×10^{-9}	2.29×10^6	1.43×10^7	1.127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อตกลงอื่นๆ และข้อควรระวังอื่น ๆ ของเอกสารทุกฉบับก่อนการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส ของรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การหาค่า ω_0 จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมแล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ (4.9)

$$\omega = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.9)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \xi_0 \quad (4.10)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการ (4.8) มาปรับปรุงใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \xi_0 \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดแกน y นั้นจะได้ค่า ξ_0 แล้วจะสามารถหาค่า ξ_0 ได้ จากนั้นจะหาค่า σ_T ได้จากสมการ

$$\xi_0 = 2\sigma_T v_{th} N_c \quad (4.12)$$

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th} N_c} \quad (4.13)$$

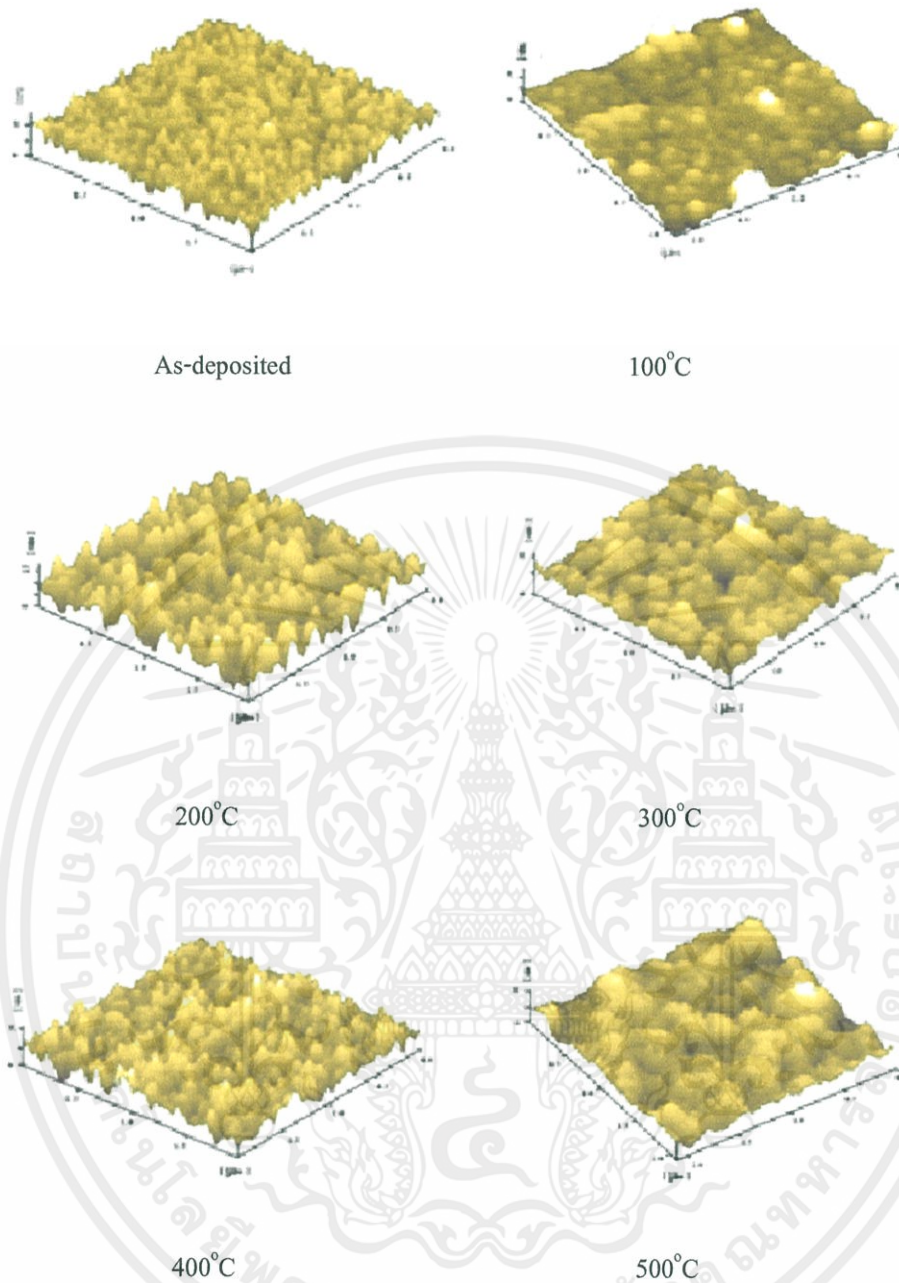
เมื่อ ξ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกัณฑ์ประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือพื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกัณฑ์ประจุ ค่าพลังงานกระตุ้น E_s สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $1,000/T$ ซึ่ง ω_0 สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะพบอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าของ ξ_0 และ σ_T นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยค่า ξ_0 ที่ได้จากวิธีการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าอยู่ที่ 4.23×10^2 ต่อวินาทีเคลวินยกกำลังสอง ($s^{-1}K^2$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่กำลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์ สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียสของรอยต่ออวิวิพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

T (°C)	ω_0 (rad/s)	E_a (meV)	ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_t (cm ⁻²)
25	8.41E+06			
40	8.47E+06			
50	1.08E+07			
60	1.09E+07	0.042815	4.23x10 ²	2.11x10 ⁻²⁴
70	1.13E+07			
80	1.19E+07			
90	1.43E+07			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิในช่วง 100-500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานในโครงการพิเศษนี้ เริ่มจากการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ CdSe และ In_2Se_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ บดคลุกเคล้าให้เข้ากันดีแล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการเคลือบฟิล์มบางลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ จากนั้นนำไปเข้าเตาแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิ 100- 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ถัดจากนั้นจึงนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกระดับจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In และทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงโดยการวัดความต้านทานแผ่น สำหรับศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ จะต้องทำขั้วไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางโดยอาศัยกาวเงินเป็นขั้วไฟฟ้าด้านบน ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านล่างคือฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามแบบวงจรสมมูลที่ได้ตั้งสมมติฐานเอาไว้

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวทไรท์ ระบาย (002) จะโดดเด่นมาก ส่วนระบาย (103) จะมีความเข้มต่ำมาก แต่เมื่อทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุ In และแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในช่วง 100 –500 องศาเซลเซียส พบว่า การจัดเรียงตัวของระบาย (002) อย่างโดดเด่นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัลที่เพิ่มขึ้น

จากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล แสดงว่าอะตอมของธาตุ In มีผลต่อช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In และจากการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In พบว่าความต้านทานแผ่นต่ำสุด เท่ากับ 240 โอห์ม/ตารางเซนติเมตร แต่ภายใต้การฉายแสงจากหลอด ELH พบว่าความต้านทานแผ่นลดลง อีกเล็กน้อยเป็น 233 โอห์มต่อตารางเซนติเมตร แสดงว่าในฟิล์มบางมีระดับพลังงานเนื่องจากข้อบกพร่องของผลึกบางชนิด จึงสามารถตอบสนองต่อแสงได้ ส่งผลให้ปริมาณพาหะอิสระ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ข้อบกพร่องของผลึกในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ทั้งที่ไม่ได้เจือและทั้งที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ In มีความซับซ้อนอย่างมาก ข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้มักจะทำหน้าที่เป็นกับดักประจุที่มีค่าเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) ที่แตกต่างกัน โดยสามารถเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้ากลับลดลง

จากกราฟความสัมพันธ์ของสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส สภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แต่สำหรับอุณหภูมิในช่วง 80 – 90 องศาเซลเซียส สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานกระตุ้นมีค่าต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส และคิดได้ว่าพลังงานกระตุ้นจะต้องมีอย่างน้อย 2 ค่า ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ค่าจำนวนจริง Z' ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนลดลงอย่างไม่สม่ำเสมอตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z'') และแนวโน้มการลดลงของ Z' และ Z'' ก็เปลี่ยนไปเมื่อความถี่สูงกว่า 3×10^7 เฮิร์ตซ์ ด้วยเช่นเดียวกัน

สรุปได้ว่าเราสามารถเจืออะตอมของธาตุ In ลงในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยการบดเนื้อสารให้เข้ากันจากนั้นนำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสและแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะให้ความต้านทานแผ่นต่ำสุดที่ 240 โอห์ม/ตารางเซนติเมตร ขณะไม่มีการฉายแสง สำหรับภายใต้การฉายแสงความต้านทานจะลดลงเพียงเล็กน้อย วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ $Cu_xS/CdSe:In$ ได้เป็นอย่างดี

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. กระจกสไลด์ที่ใช้มีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อนำไปวางบนหน้าฉากของการระเหยจะส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้ มีรูปทรงไม่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สวยงาม
2. การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:In ให้มีคุณภาพดี จะต้องมีความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับขณะทำการระเหยสาร ในโครงการพิเศษนี้ไม่ได้ให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ
3. ระบบสุญญากาศต้องสะอาดเพียงพอ ดังนั้นต้องใช้เวลาในการทำ ความสะอาดอย่างมาก
4. สารตั้งต้นที่จะใช้ระเหยสารควรทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำเข้าระบบสุญญากาศทันที
5. เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์มักเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึก โดยเฉพาะกับดักประจุอย่างมาก ดังนั้นการวัดและการแปรผลการทดลองจึงต้องกระทำอย่างพิถีพิถัน

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-อินเดียม ไดซีลีไนด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของแสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.

คูสิต เครื่องงาม, 2542. “สิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม1” กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Aquili, A.K.S., Maqsood, A. and Ali, Z., 2001. Properties of copper-doped ZnTe film by Immersion in Cu solution, **Appl. Surf.Sci.**, 180: 73-80

Aquili, A.K.S., Maqsood, A. and Ali, Z., 2002. Properties of Ag doped ZnTe thin films by an ion exchange process, **Appl.Surf Sci.**, 191 : 280-285.

Cullity, B.D., 1956. Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company Inc.

Dakhel, A.A., 2006. Correlated structural and electrical properties of thin manganese oxide films, **Thin Solid Films**, 496: 353 – 359.

Houssain , M.S., Islam , R., and Khan, K.A., 2008. Temperature effect on the the electrical properties of undoped and vanadium – doped ZnTe thin films, **Renewable Energy**, 33: 642-647.

Kittel, C. 2005 **Introduction to Solid State Physics**, 8th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

Rao, G.K., Bemgera, K.V., and Shivakumar, G.K., 2009. The effect of substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of vacuum deposited ZnTe thin films, **Vacuum**, 83: 1485 – 1488.

Runyan, W.R., 1975, **Semiconductor Measurement and Instrument**, 3rd ed, Mc.Graw-Hill, New York.

Swegllam, A., Alfaramawi,K., Abboudy, S., Iman, N.G., and Motaweh, H.A., 2010. Growth and current – voltage characterization of ZnTe/CdTe heterojunctions, **Thin Solid Films**, 519: 681-685.

Sze, S.M., 1981. Physics of Semiconductor Devices, 2nd. ed., John Wiley & Sons New York.

Van der Pauw L.J., 1958. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, Philips Res. Reports, 13 : 1-9.

Wu , L.L., Feng, L.H., Li, W., Zhang, J.Q., Li,Bo, Lei, Z., Cai,W., Cai, Y.P, amd Zheng, J.G., 2007 Effect of ZnTe/ZnTe:Cu complex back – contact on device characteristics of CdTe solar cells, **Sci. China Ser. E – Tech Sci.**, 50 : 199 – 205.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhang, J.Q., Feng, L.H., Cai, W., Zheng, J.G., Cai, Y.P., Li, B., Wu, L.L., and Shao, Y., 2002. **Thin Solid Films**, 414: 113-118.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-2307

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Cd Se	2th	l	h	k	j
	23.882	100	1	0	0
	25.391	59	0	0	2
Cadmium Selenide	27.097	76	1	0	1
	35.136	34	1	0	2
	41.999	72	1	1	0
	45.810	68	1	0	3
	48.888	11	2	0	0
	49.718	42	1	1	2
Lattice : Hexagonal	50.699	10	2	0	1
	52.150	1	0	0	4
S.G. : P63mc (186)	55.879	7	2	0	2
	58.130	1	1	0	4
a = 4.29900	63.884	19	2	0	3
	66.379	13	2	1	0
	67.880	7	2	1	1
	69.099	1	1	1	4
c = 7.01000	71.902	13	1	0	5
	72.296	5	2	1	2
Z = 2	74.268	<1	2	0	4
Volume [CD] = 112.20	76.735	7	3	0	0
Dx = 5.665	79.435	17	2	1	3
	82.365	6	3	0	2
	82.496	2	0	0	6
	86.916	6	2	0	5
	87.422	1	1	0	6
	89.181	<1	2	1	4

ICSD COLLECTION CODE : 060630

REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakineos, Stevenso

REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982.35 415 424.

TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

*Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 530, (1984)

Stevenson, A.W., Barnea, Z.

Radiation : CuK α 1

Filter : Not specified

Lambda : 1.54060

d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		2th	l	h	k	j
Cd Se		25.354	100	1	1	1
Cadmium Selenide		42.010	55	2	2	0
		49.699	25	3	1	1
		60.943	2	4	0	0
		67.083	4	3	3	1
		76.780	4	4	2	2
		82.404	2	5	1	1
		91.553	2	4	4	0
		97.164	2	5	3	1
		106.639	2	6	2	0
		129.607	2	5	5	1
		143.329	2	6	4	2
		153.789	2	7	3	1

Lattice : Face-centered cubic **Mol. weight** = 191.37
S.G. : F-43m (216) **Volume [CD]** = 224.42
a = 6.07700 **Dx** = 5.664

Z = 4

COLOR : Black
 SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Samples prepared by Sakai Chemical Industrial Company, Limited, Osaka, Japan.
 GENERAL COMMENTS : Purity: 99.999%.



CAS: 1306-24-7

*Private Communication, (1967) primary reference :
 Takahashi, Governmental Industrial Research Institute, Osaka, Japan.

Radiation : CuKα **Filter** : Beta
Lambda : 1.54180 **d-sp** : Not given
SS/FOM : F13= 11(0.0540,21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นายจิรยุทธ คอนอินชัย

เกิดเมื่อ

วันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2533

ภูมิลำเนา

จังหวัดน่าน

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ. 2551 จบการศึกษามัธยมปลาย

โรงเรียนสตรีศรีน่าน

ปี พ.ศ. 2552 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์

ประยุกต์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน

นางสาวพรหมพักตร์ ดาวรัตน์

เกิดเมื่อ

วันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2554

ภูมิลำเนา

จังหวัดอุดรธานี

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ. 2551 จบการศึกษามัธยมปลาย

โรงเรียนอุดรพิชัยรัษฎ์พิทยา

ปี พ.ศ. 2552 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์

ประยุกต์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้