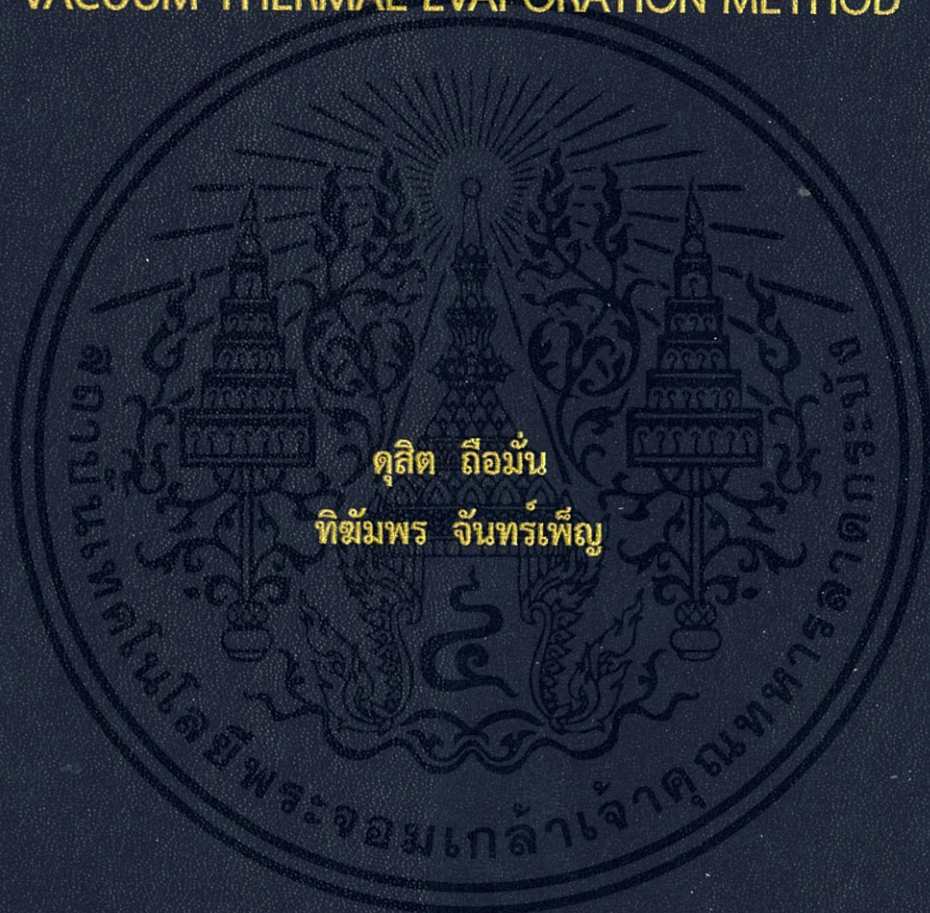


การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศ

STUDY OF $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ THIN FILMS DEPOSITED BY
VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD



ดุสิต ถิ่นมั่น

ทิฆัมพร จันทรเพ็ญ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศ

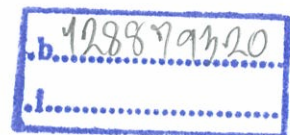
STUDY OF $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ THIN FILMS DEPOSITED BY
VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD



T149062

ดุสิต ถิ่อมัน
ทิชัมพร จันทรเพ็ญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **149062**
วัน,เดือน,ปี... **27.8.2560**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ THIN FILMS DEPOSITED BY
VACUUM THERMAL EVAPORATION METHOD



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

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
 Study of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ Thin Films Deposited by Vacuum Thermal Evaporation Method

ชื่อนักศึกษา นายดุสิต ถิ่นมัน รหัสนักศึกษา 55051501
 นายทิมมพร จันทรเพ็ญ รหัสนักศึกษา 55051503

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2558
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ประธานกรรมการ	
อ.ภาอรุจ บัณฑิตธาตวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	
ชื่อนักศึกษา	นายดุสิต ถิ่นมัน	รหัสนักศึกษา 55051501
	นายทิมมพร จันทร์เพ็ญ	รหัสนักศึกษา 55051503
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งานนิตย์ วงษ์เจริญ	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบของ CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่มีเศษส่วนโดยมวล (x) ต่ำกว่า 0.2 จะเป็นแบบเฮกซะโกนัล ที่มีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002) โดดเด่นที่สุด ในขณะที่กรณีเศษส่วนโดยโมล (x) ตั้งแต่ 0.8 จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก และมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ปรากฏโดดเด่นที่สุด สำหรับกรณีที่เศษส่วนโดยโมล (x) เป็น 0.4 และ 0.6 จะปรากฏเฟสคิวบิกและเฮกซะโกนัลเกิดร่วมกัน และความโดดเด่นของพีค (002) และ (111) จะลดลง ลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางสามารถคำนวณได้จากความต้านทานที่เปลี่ยนไปในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อาจมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Title	Study of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ Thin Films Deposited by Vacuum Thermal Evaporation Method	
Students	Mr.Dusit Thueman	Student ID 55051501
	Mr.Thikhamporn Jarpen	Student ID 55051503
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen	

Abstract

In this special project, the study of physical properties of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) thin films deposited by vacuum thermal evaporations method using CdS and ZnTe powders at high purity grade on glass substrate was performed. The XRD pattern shown that thin films were crystallized in pure hexagonal phase with (002) preferred orientation at $x \leq 0.2$. While, $x \geq 0.8$, these films were crystallized in pure cubic phase with (111) preferred orientation. For the composition $x = 0.4$ and 0.6 , the cubic and the hexagonal phases were found to coexist in the system and the films become less preferentially oriented. SEM and AFM were used to study morphological features of the films. Energy gap values were calculated from the optical transmission spectra. Electrical properties were performed by Hall effect measurements with van der Pauw technique. The activation energy were evaluated from the variation of electrical resistance at high temperature. These parameters can be useful for solar cell application.

Keywords : AFM, $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ thin films, Hall Effect, SEM, thermal evaporation method, XRD

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติณัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ยามนิตย์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระยะเหยสารเคมี ด้วยความรื้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ตลอดมารวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่ดั่งงามให้กับลูกศิษย์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ คุณชนิภรณ์ จุไรสงและคุณนพณัฐ เดชะคำภู นักศึกษาปริญญาโทใน ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพโตนิคส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะ เฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่า ความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษามาคณะบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ดุสิต ถิ่นมั่น

ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัตถุประสงค์เชิงสารกึ่งตัวนำ	4
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II – VI	4
2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	5
2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	6
2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก	7
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	7
2.3.2 การระบุทิศทาง	7
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ	7
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	8
2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	9
2.4.2 การหาขนาดของเกรน	10
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	11
2.6 การส่งผ่านแสง	12
2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	13
2.6.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	14
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	15
2.7.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	15
2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	17
2.7.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	18
2.7.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	24
2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	27
2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	34
2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	35
2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	36
2.9.1 อัตราการระเหยสาร	37
2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	37
2.9.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	37
2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป	38
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
2.10.1 การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO	39
2.10.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอัลลอยของฟิล์มบาง $Cd_xZn_yTe_z$ และรอยต่อของฟิล์มบาง $Cd_xZn_yTe_z$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสปัตเตอร์ริงด้วยคลื่นวิทยุ	39
2.10.3 ผลของการแอนนีสในอากาศที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสงรูปพรรณสัณฐาน และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdSe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการงานวิจัย	44
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	44
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	44
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	44
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	45
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	45
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	45
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	45
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ องค์ประกอบต่างๆ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0) เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	45
3.2.1 การคำนวณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq X \leq 1.0$)	45
3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	48
3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ	48
3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	48
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานต่างๆของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$	50

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง	50
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค	50
3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค	50
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	50
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ความต้านทานแผ่น (R_S) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (ρ_B) ด้วยวิธีสองขั้ว	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	56
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	57
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	60
4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	60

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	68
4.4.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	68
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
4.4.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	90
5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
5.1.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
5.1.3 ผลของการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91
5.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

5.2 ข้อเสนอแนะ
เอกสารอ้างอิง
ภาคผนวก

หน้า
92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงความหนาของฟิล์มบางในแต่ละชั้น, ความหนาของฟิล์มบางทั้งหมด และองค์ประกอบของฟิล์มบาง CZT ที่ถูกวัดโดยเครื่อง EDX	41
3.1	แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq X \leq 1.0$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	47
4.1	แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	55
4.2	แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	58
4.3	แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	60
4.4	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%	64
4.5	แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	67
4.6	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	69
4.7	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	83
4.9	ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์รันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์ภาพที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	89



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ	4
2.2 พันธะสีหน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	5
2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ	6
2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ	6
2.5 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	7
2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	9
2.7 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	10
2.8 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	10
2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
2.10 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	12
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	13
2.12 ส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	15
2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	16
2.14 ต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	16
2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	17
2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	18
2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	19
2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	21
2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	25
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I)	26
2.21 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{tc}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	27
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	31
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่น ของดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	34
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของ ดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	35
2.26 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	38
2.27 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	38
2.28 พิศความเข้มข้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บน แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ	39
2.29 แสดงรูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง	40
2.30 แสดงกราฟ I-V characteristics ของรอยต่อ CdS/Cd _{44.33} Zn _{5.61} Te _{50.06} เมื่อปิดแสง	41
2.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซิลิไซด์	42
2.32 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซิลิไซด์	43
3.1 สารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x เมื่อ $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ที่ทำการบด คลุกเคล้าให้เข้ากัน	47
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	49
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	51
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐาน รองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	52
4.2 แสดงพิศความเข้มข้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_H , c_H และ a_C กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	54
4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	57
4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	60
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	61
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) เพื่อหาค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	63
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนทางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x)ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65
4.12 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400-4000\text{cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.13 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400-100\text{cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	69
4.15 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	70
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	74
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	74
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	75
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81
4.34 แสดงตัวอย่างการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$	82
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	84
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึม ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85
4.37 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	86
4.38 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นลดลงจึงทำให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันที่มีราคาเพิ่มขึ้นสูงมากทั่วโลก ในหลายประเทศได้มีการหามาตรการต่างๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ เพื่อมาทดแทนที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำและใช้ได้ในระยะยาวนาน

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบคเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 จากการศึกษาสมบัติของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า การวิจัยและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II – VI เช่น สารกึ่งตัวนำ CdS และในกลุ่ม II – IV เช่น สารกึ่งตัวนำ ZnTe ได้ดำเนินไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและญี่ปุ่น เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพียงติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะเป็นรอยต่อได้ทั้งแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น แต่ที่น่าสนใจคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterojunction) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) เช่น $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) และมี CdS ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็น จะทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีส่วนประกอบเป็นชั้นๆ ดังนี้คือ $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2/\text{Mo}/\text{Sodalime glass}$ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 19.3% และเนื่องจากในชั้นบัฟเฟอร์คือสารกึ่งตัวนำ CdS เป็นสารประกอบในกลุ่ม II – VI ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ ประมาณ 2.42-2.53 อิเล็กตรอนโวลต์ และสารกึ่งตัวนำ ZnTe เป็นสารประกอบในกลุ่ม II – IV มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และมีค่าเท่ากับ 2.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเลเซอร์หรือไดโอดเปล่งแสงย่านสีเขียวซึ่งสายตามนุษย์จะตอบสนองต่อแสงสีเขียวได้เป็นอย่างดีรวมทั้งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นถ้าเลือกใช้สารประกอบ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ แทน CdS จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นได้ดีขึ้นเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ วิธีสปัตเตอริง วิธีสเปร์ยไฟโรไลซิส และวิธีอบสารละลายเคมี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์แล้วใช้กาวเงินทำขั้วไฟฟ้า และในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากกระบวนการข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnTe ความบริสุทธิ์สูง 99.999%
- 2) ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 3) ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 4) ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น การวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า รวมทั้งการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ประดิษฐ์ขึ้น

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe ตามองค์ประกอบ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 2) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 3) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง
- 4) ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดกระแส-แรงดัน เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าเพื่อหาความหนาแน่นของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
- 2) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe ตามองค์ประกอบ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 4) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดกระแส-แรงดัน เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และการวัดความจุ-แรงดันไฟฟ้าเพื่อหาความหนาแน่นของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 7) จัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
- 3) ทำให้ทราบถึงผลขององค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ที่มีต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4) ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาทฤษฎีและกฎเกณฑ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆได้

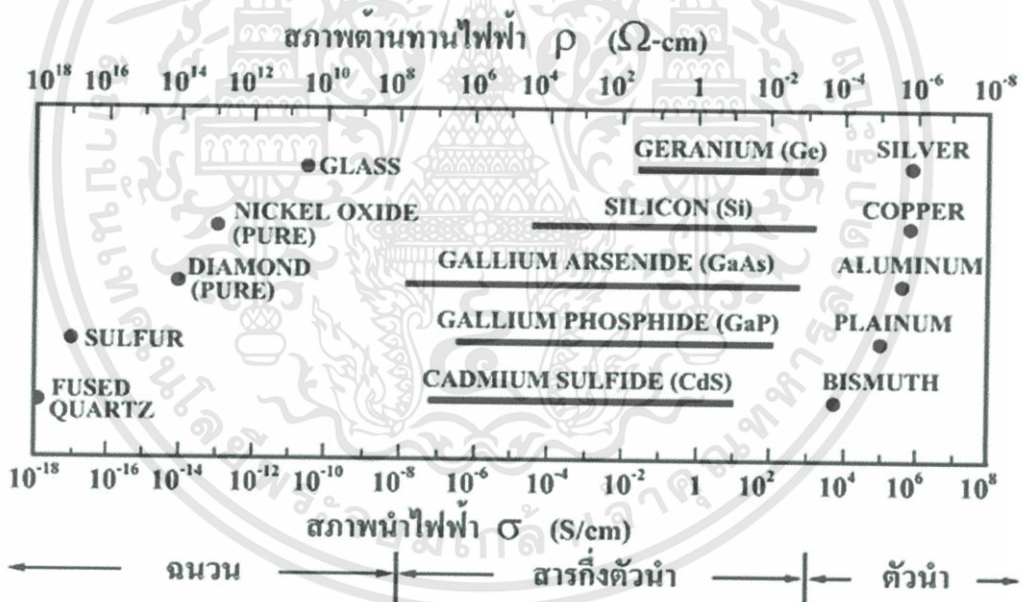
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย, 2530; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ

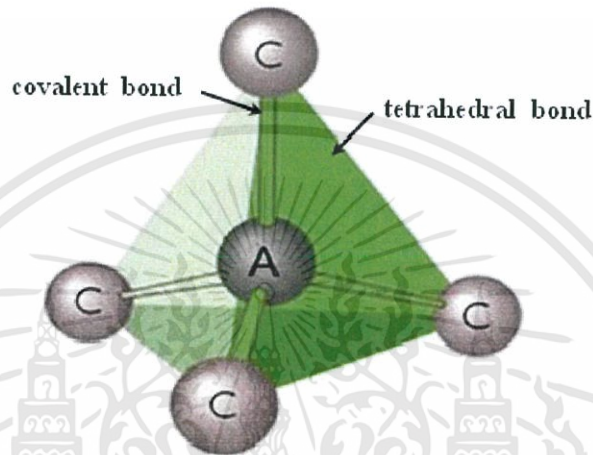
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

(งามนิตย, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542)

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก ส่วนโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

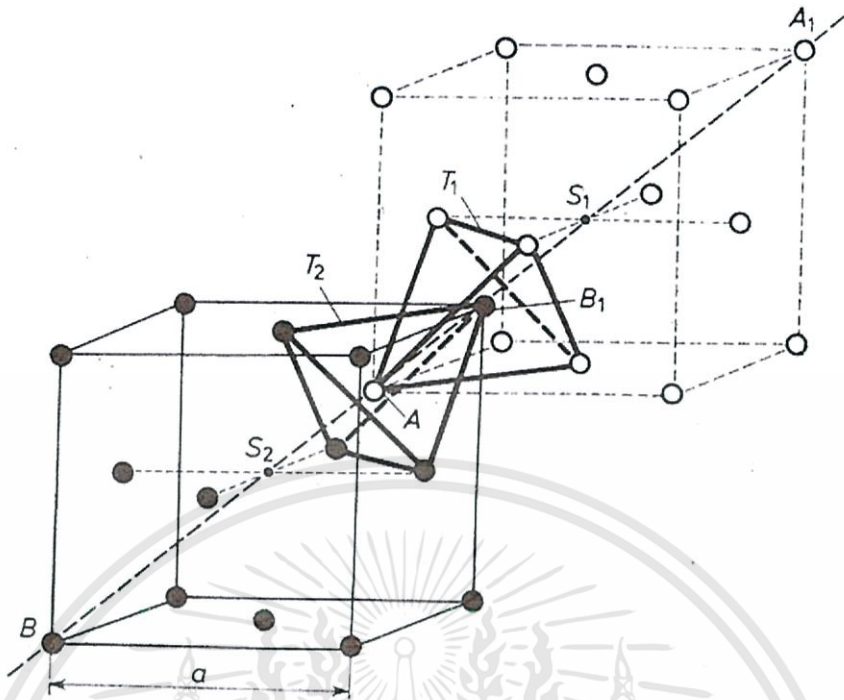
VI (อะตอม C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)



รูปที่ 2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

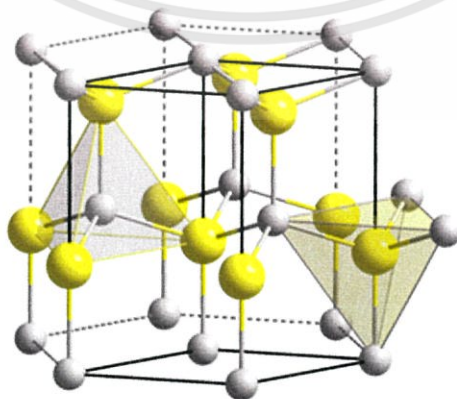
โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดหรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V และสารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นในสารกึ่งตัวนำ ZnTe อะตอมของธาตุ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0,0)$, $(0,1/2,1/2)$, $(1/2,0,1/2)$ และ $(1/2,1/2,0)$ ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Te จะอยู่ที่ $(1/4,1/4,1/4)$, $(1/4,3/4,3/4)$, $(3/4,1/4,3/4)$ และ $(3/4,3/4,1/4)$ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกันคือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย, 2551; จูตินัย, 2551)

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

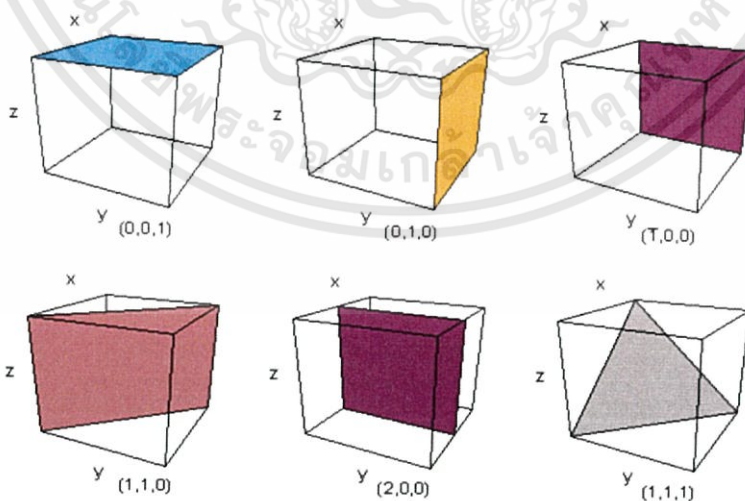
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยสังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x = 1, y = 2, z = 3$

2.3.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ โดยสังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยมและไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นวงเล็บก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}21]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.3.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) นั้นจะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0,1/1,1/0)$ หรือที่จุด $(\infty,1,\infty)$ นั้นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.5 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, งามนิตย์, ณัฐพร, 2550; ฐิติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

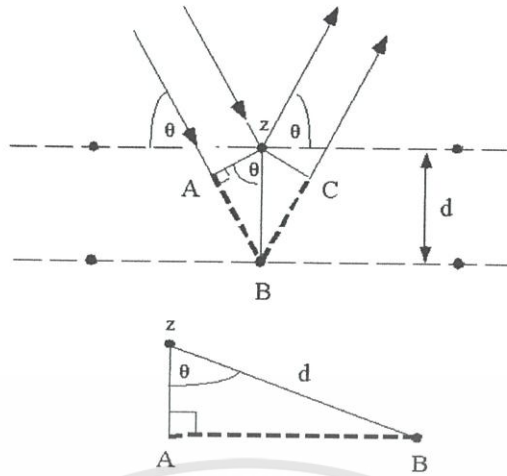
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

- เมื่อ
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 - d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
 - θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
 - n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...
 - 2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้ สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบ ซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

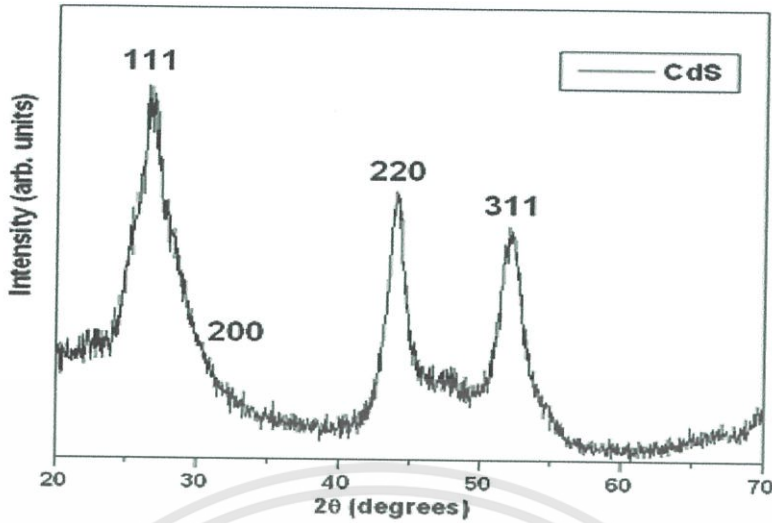
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



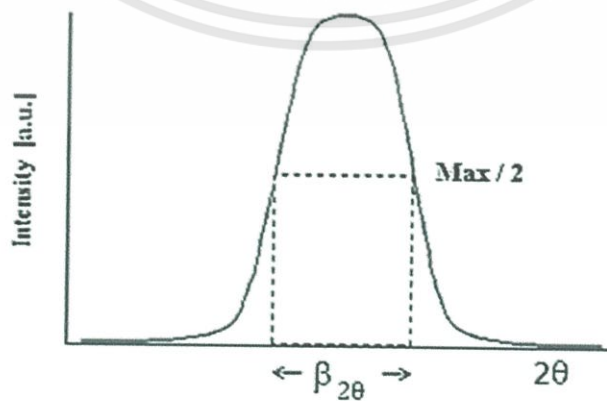
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.4.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุดดังในรูปที่ 2.8 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \tag{2.4}$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
- k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
- $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)



รูปที่ 2.8 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

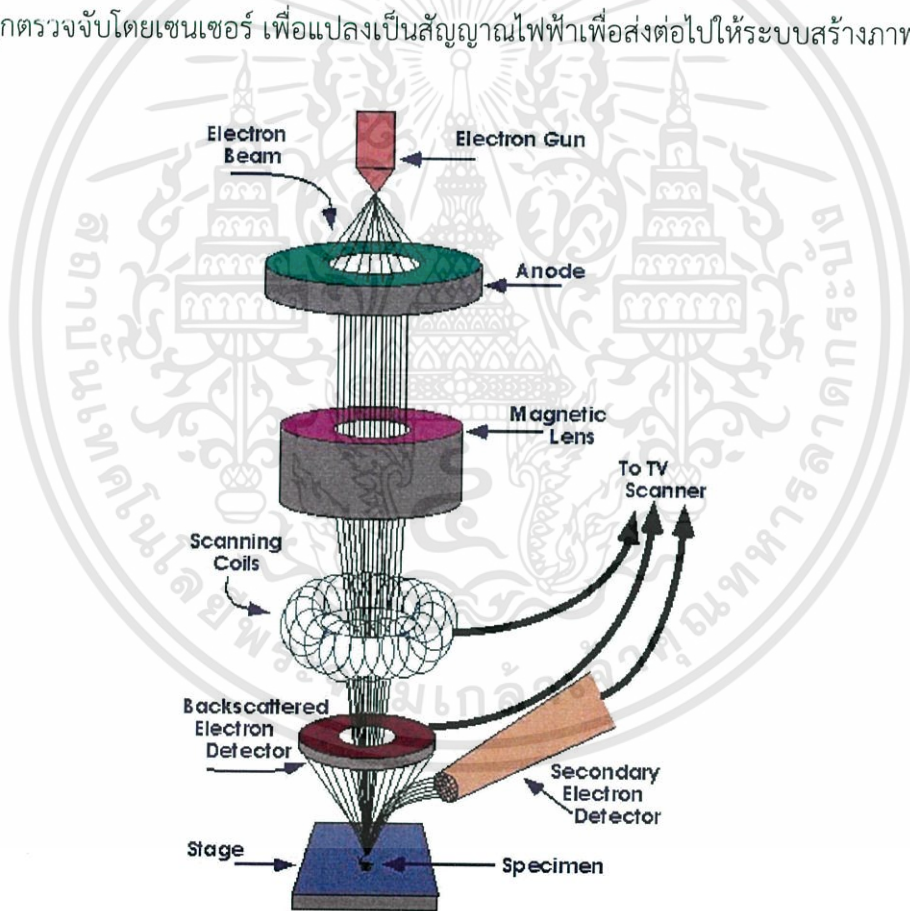
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ.2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์ - วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

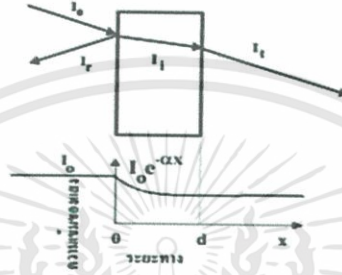


รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การส่งผ่านแสง (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุขฤกษ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

การศึกษาวិธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

- เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
 I_R คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
 I_r คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
 I_I คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
 T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
 d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.5)$$

หรือ $I_x = RI_0 \quad (2.6)$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

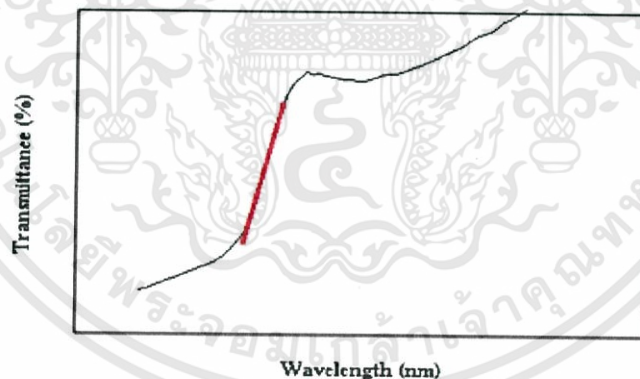
$$I_t = I_0 e^{-\alpha d} = (1-R) I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R) e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ได้จากรูปที่ 2.10 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น
$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.11)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.12)$$

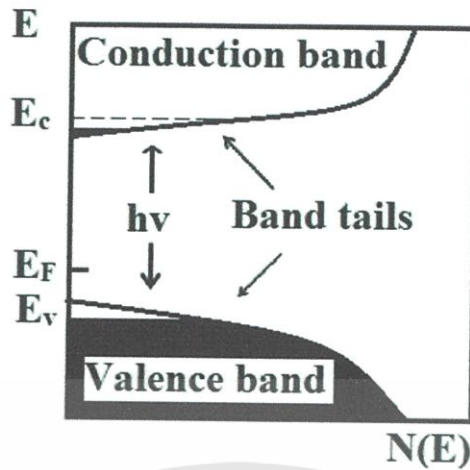
เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.6.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.14)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด
 k_B คือ ค่าของที่ของโบลต์ซมันน์
 T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
 σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์

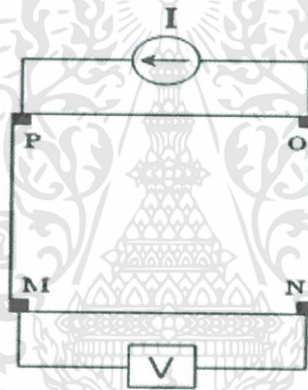
วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นสารตัวอย่างรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.14 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_I จากสมการที่ (2.15)

$$R_I = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \tag{2.15}$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.16)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \tag{2.17}$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \tag{2.18}$$

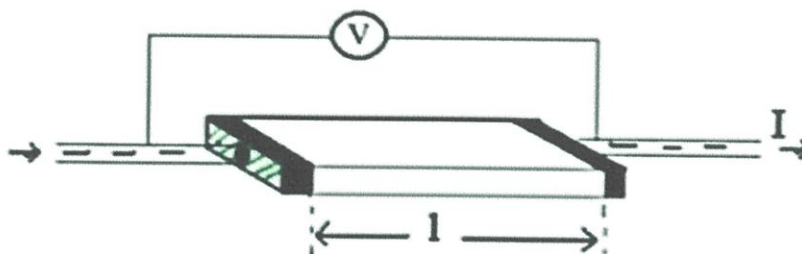
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \tag{2.19}$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.15 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A เป็นบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.15 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

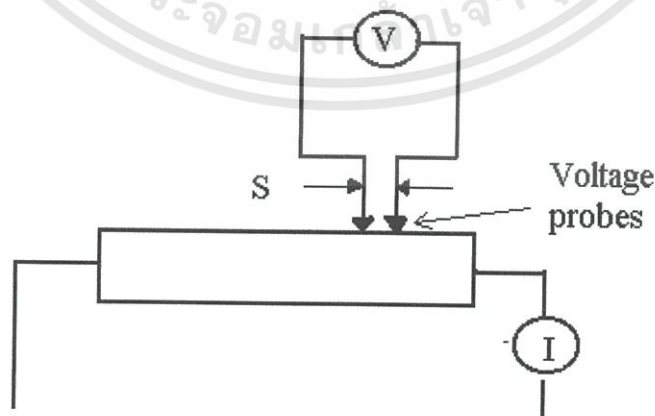
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.21)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่นั้น (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) ตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.7.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

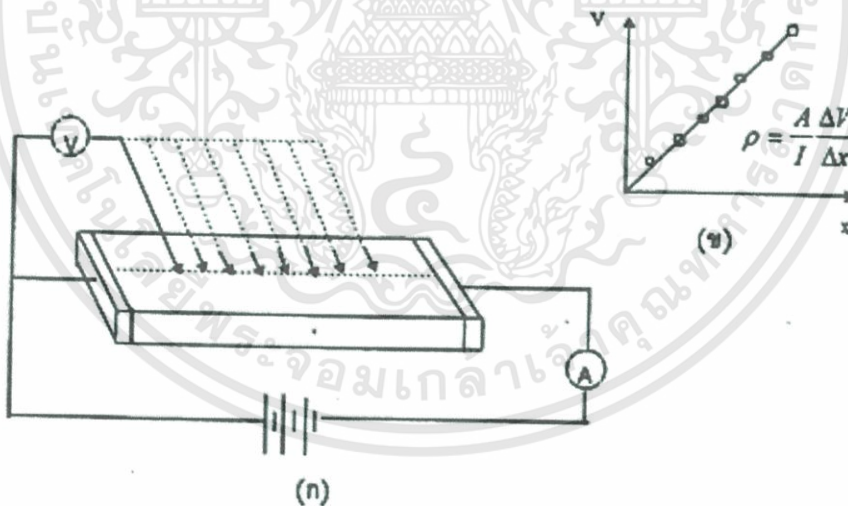
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.7.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.22)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.23)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.24)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ
 μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะช่วยให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

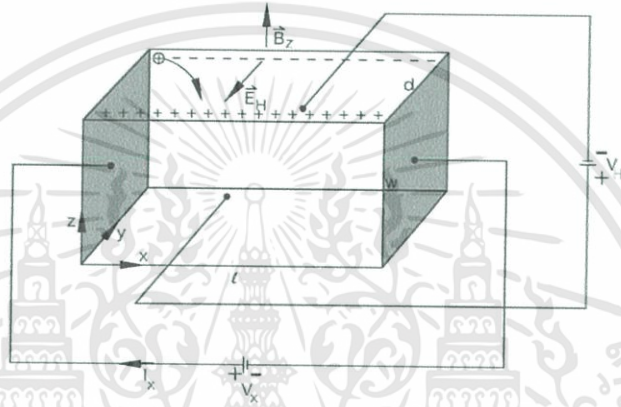
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี
ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{I}{e\rho\mu_p} \quad (2.26)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน V_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

จาก

$$I = nqVA$$

ดังนั้น

$$I_x = qnV_x(wd) \quad (2.27)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.28)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.29)$$

จากรูปที่ 2.18

$$A = w \cdot d \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) และ (2.30)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.31)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทางของ y (Hall voltage: V_H) ขึ้นทำให้กลุ่มพาหะข้างมากชนิดโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(V_x \times B_z) + qE_y \quad (2.32)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = V_x B_z = \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.33)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.33) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.35)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{I}{qn} \quad (2.36)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy$$

$$= \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.37)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.38)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{I}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.39)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.40)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.41)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.42)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.43)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนส์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.44)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.42) และ (2.43) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.45)$$

หรือ จากสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{I}{\rho} \quad (2.46)$$

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.7.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.19 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพา์บ์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจะเข้าในแนวทะแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.47)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพา์บ์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

D คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

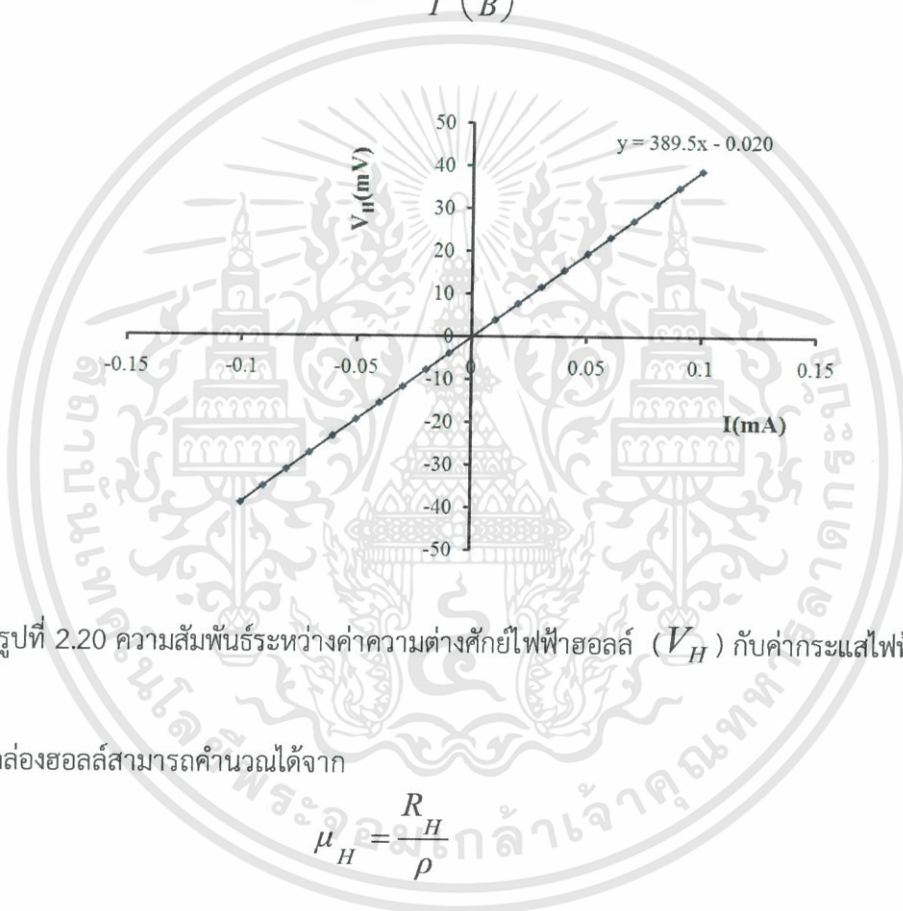
B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.48) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.49)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.20 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า

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



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.50)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดออกการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

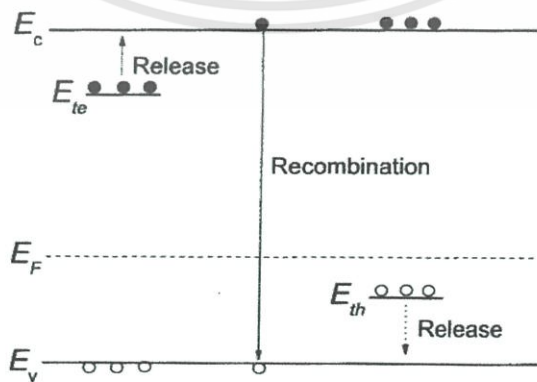
$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.51)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2554; จูตินัย, 2556; Kiltel, 1971; Sze, 1981)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.21 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะที่ปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชั่นลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสง กับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลาานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{ie}) และกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{ih}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.5)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = \frac{v}{\xi}$ และ $\xi = \frac{V_a}{l}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.53)$$

แทนสมการที่ (2.52) ลงในสมการที่ (2.53) จะได้

$$I = en\mu V_a \frac{wd}{l} \quad (2.54)$$

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

$$n = N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.55)$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงในสมการที่ (2.54) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.56)$$

กระแสรวมทั้งหมด I ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left[N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.57)$$

เมื่อ N_i คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{ii} = \left(\frac{l}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.58)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.54) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) ndV_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \end{aligned} \quad (2.59)$$

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักตักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left[\sigma_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i} \right) \right] \quad (2.60)$$

เมื่อ σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \left(\frac{l}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.61)$$

โดยที่	V_a	คือ	แรงดันแรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
	μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
	w	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	l	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	d	คือ	ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	I	คือ	กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
	τ_r	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
	N_{ii}	คือ	ความหนาแน่นของกักตักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	σ_{ii}	คือ	ความหนาแน่นของกักตักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1000)k} \left(\frac{1000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ ความชัน $= \frac{E_t}{1000k}$

ดังนั้น $E_t = \frac{(1000)k(\text{ความชัน})}{q}$

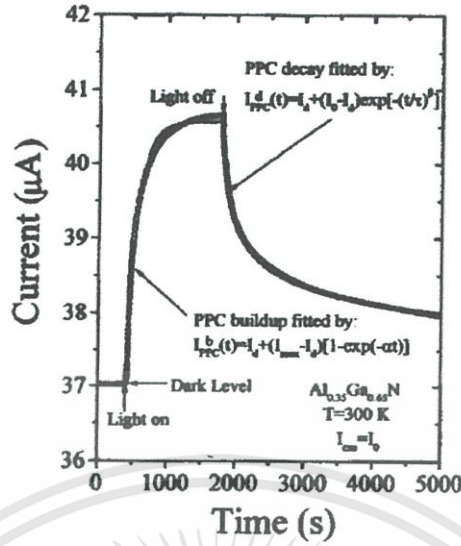
$= (0.086)(\text{ความชัน})$ อิเล็กตรอนโวลต์ (2.63)

ในการศึกษาสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.64)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t = 0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.65)$$

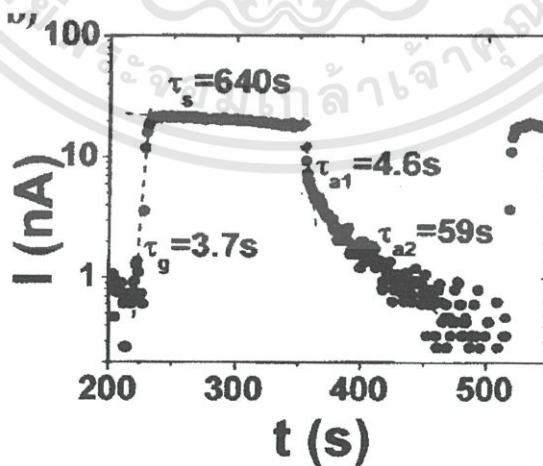


รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.64) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0' - \frac{t}{\tau_d} \tag{2.66}$$

ความชันของกราฟ คือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกัณฑ์พหุคูณมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโพลิตาของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.60) และสมการที่ (2.65) ดังนี้ คือ (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left[\frac{w}{l} \right] V_a \sigma_{i2} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.67)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.66) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left[\frac{w}{l} \right] V_a \sigma_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.68)$$

จากสมการที่ (2.68) สามารถที่จะหาค่า σ_{i1} และ σ_{i2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.61) ดังนี้คือ

$$\sigma_{i1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.68)$$

$$\sigma_{i2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.69)$$

กัณฑ์พหุคูณทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t = 0$) ที่เกี่ยวกับกัณฑ์พหุคูณทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{i1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{i2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right)$$

สมการที่ (2.68) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|I_p| = A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right)^\beta\right] \quad (2.70)$$

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

ในกรณีกระแสโพลิตาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.71)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เม็ดเซรามิก กระแสโพลิตาขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.57) และสมการที่ (2.68) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{i1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.72)$$

จากสมการที่ (2.72) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{i1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a}\right) \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.73)$$

$$N_{i2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a}\right) \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.74)$$

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.72) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

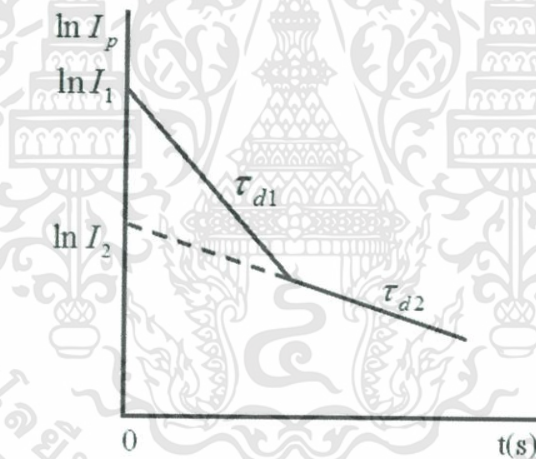
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.75)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิเคราะห์กราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น ก็ สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) \right] + A_2''' \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \right] \quad (2.76)$$

2.8.1 วิธีหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของดับตักพาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาค่าได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.77)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{r1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.78)$$

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

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.79)$$

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

$$\sigma_{r2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.80)$$

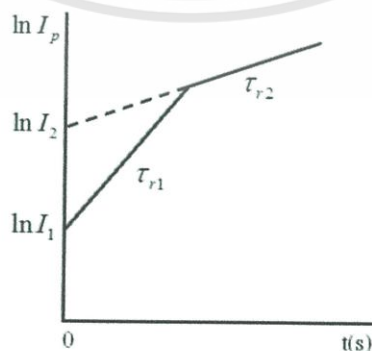
สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิกก็สามารถใช้สูตร

$$N_{r1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.81)$$

$$N_{r2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.82)$$

2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของ
 ดับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น
 กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.83)$$

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

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

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = \frac{-t}{\tau_r} \quad (2.84)$$

จากสูตร

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

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.84) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.85)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.85) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกของกราฟกระแส
 ขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัก
 พาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจะใช้สมการที่ (2.79), (2.80),
 (2.81) และสมการที่ (2.82) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเป็นวิธีการ
 เตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่
 ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.9.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.86)$$

เมื่อ ϕ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.87)$$

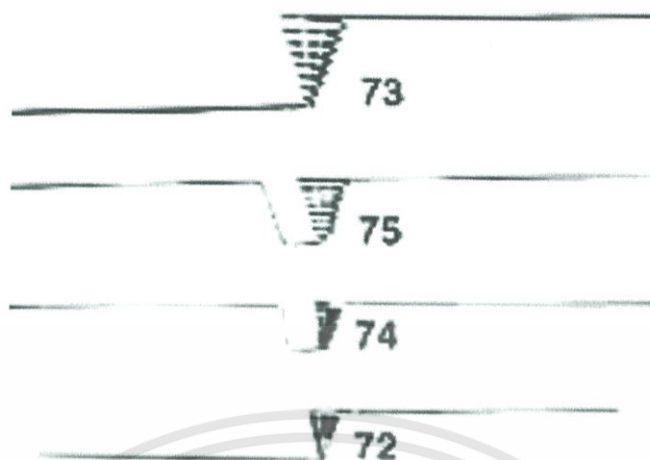
ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.9.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดี่ยวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

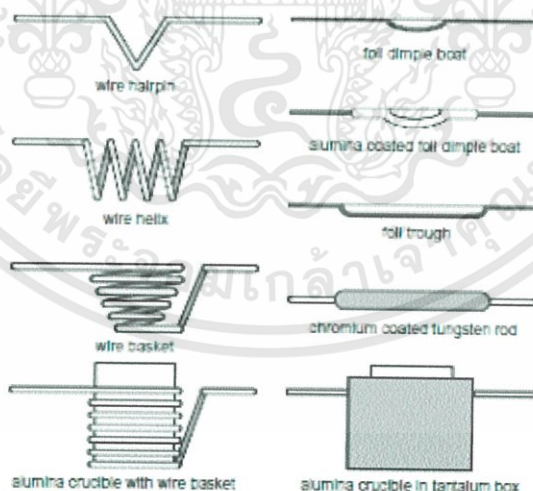


รูปที่ 2.26 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นในรูปแบบต่างๆ

Resistance Heated Evaporation Sources



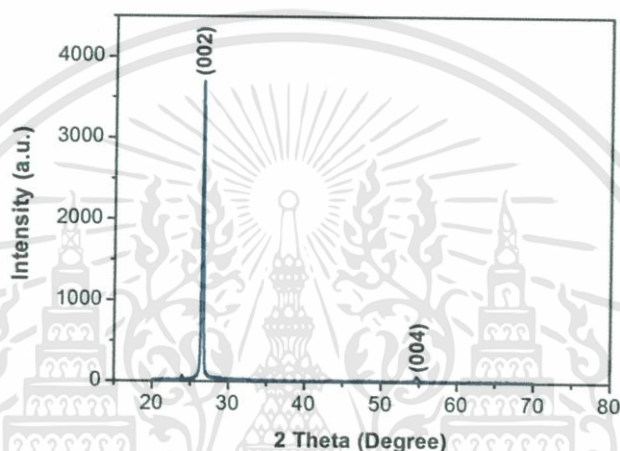
รูปที่ 2.27 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO. (ชนิภรณ์ จุไรสง, ธีรญา โชติธนนันท์. 2556)

การเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ



รูปที่ 2.28 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

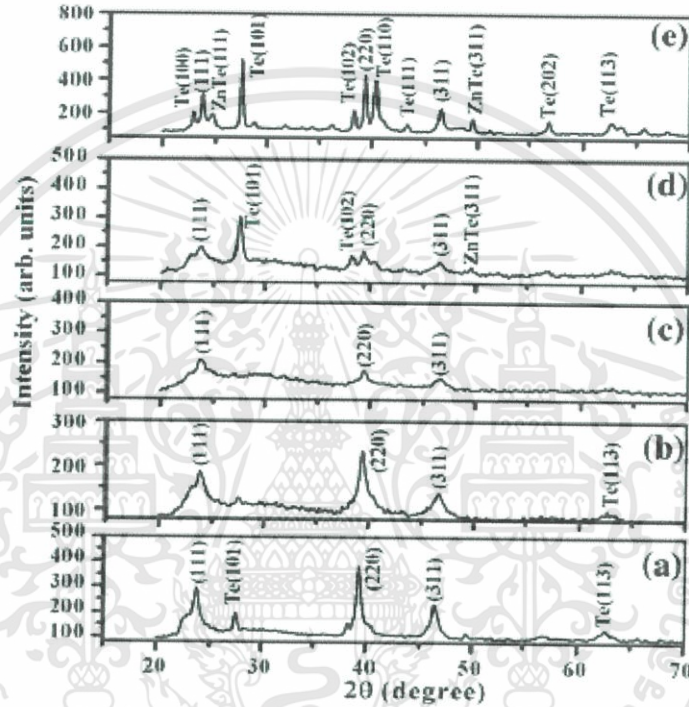
2.10.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอัลลอยของฟิล์มบาง $Cd_xZn_yTe_z$ และรอยต่อของฟิล์มบาง $Cd_xZn_yTe_z$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสปัตเตอร์ด้วยคลื่นวิทยุ

การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CZT องค์ประกอบที่แตกต่างกัน การเคลือบสารกึ่งตัวนำของชั้น CdTe และ ZnTe เรียงสลับกัน ลงบนกระจกสไลด์ โดยใช้ความดัน 10 ปาสคาล กำลังสุทธิ 100 วัตต์ โดยใช้เป้าของ CdTe และ ZnTe ในการเคลือบเราจะได้ CdTe อยู่ชั้นล่างสุด และ ZnTe อยู่ชั้นบนสุดเพื่อความสะดวกในการประดิษฐ์โครงสร้างทางไฟฟ้า

รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง CZT แสดงในรูปที่ 1 พิกัดของ XRD สำหรับระนาบของ CdTe และ ZnTe ถูกนำมาเทียบกับไฟล์ภาพมาตรฐานหมายเลข 150770 และ 150746 ตามลำดับ จึงพบพิกัดของฟิล์มบาง CZT ตรงกับระนาบ (111), (220) และ (311) จะพบว่าไม่มีพิกัดของ Te ปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในฟิล์มบาง CZT ทุกกรณี พีคของ Te จะเห็นเด่นชัดในกรณี $\text{Cd}_{36.73}\text{Zn}_{10.29}\text{Te}_{52.98}$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ $\text{Cd}_{31.74}\text{Zn}_{14.51}\text{Te}_{53.75}$ จะพบว่าไม่มีพีคของ ZnTe ปรากฏอยู่ ซึ่งพีคของ ZnTe จะปรากฏให้เห็นในฟิล์มบาง CZT เพียงบางกรณีเท่านั้น และ ในกรณีของ $\text{Cd}_{31.74}\text{Zn}_{14.51}\text{Te}_{53.75}$ จะพบว่าไม่มีพีคของ Te มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ในฟิล์มนี้แสดงให้เห็นว่ามี Te ส่วนเกินในฟิล์มนี้ จากข้อมูล EDX ตารางที่ 1



รูปที่ 2.29 แสดงรูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง

(a) $\text{Cd}_{48.75}\text{Zn}_{0.21}\text{Te}_{51.04}$

(b) $\text{Cd}_{47.50}\text{Zn}_{2.51}\text{Te}_{51.96}$

(c) $\text{Cd}_{44.33}\text{Zn}_{5.61}\text{Te}_{50.06}$

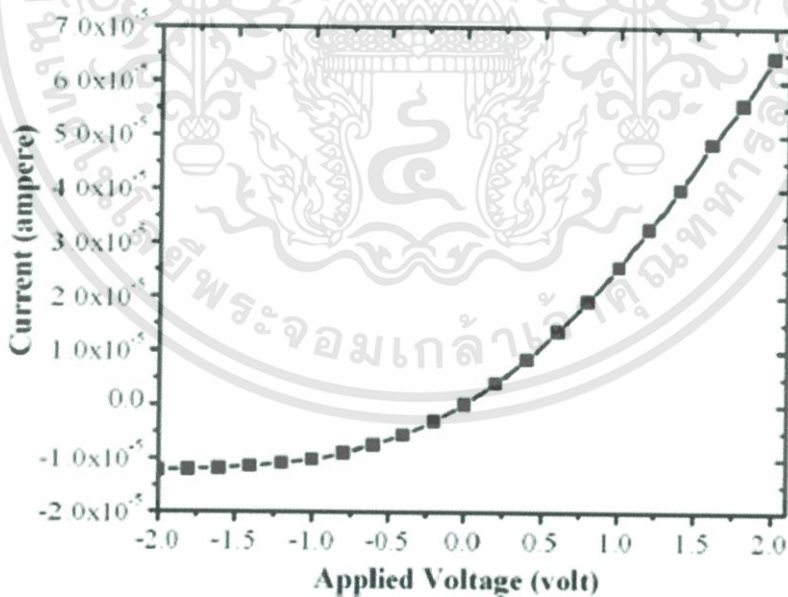
(d) $\text{Cd}_{36.73}\text{Zn}_{10.29}\text{Te}_{52.98}$

(e) $\text{Cd}_{31.74}\text{Zn}_{14.51}\text{Te}_{53.75}$

Set No.	1	2	3	4	5
CdTe (nm)	676	638	603	538	484
ZnTe (nm)	2	28	64	128	184
Total thickness (nm)	2034	1998	2001	1998	2004
Atomic concentrations (%)	Cd: 48.75	Cd: 47.50	Cd: 44.33	Cd: 36.73	Cd: 31.74
	Zn: 0.21	Zn: 2.51	Zn: 5.61	Zn: 10.29	Zn: 14.51
	Te: 51.04	Te: 51.96	Te: 50.06	Te: 52.98	Te: 53.75

ตารางที่ 2.1 แสดงความหนาของฟิล์มบางในแต่ละชั้น, ความหนาของฟิล์มบางทั้งหมด และองค์ประกอบของฟิล์มบาง CZT ที่ถูกวัดโดยเครื่อง EDX

ค่า I-V characteristics ที่ศึกษาในกรณีที่ปิดแสง ของรอยต่อ CdS/Cd_{44.33}Zn_{5.61}Te_{50.06} ที่เคลือบบนกระจก ITO และใช้กาวยเงินทำเป็นขั้วไฟฟ้าสองขั้วแสดงในรูปที่ 2 ไม่ได้ศึกษาในกรณีที่ฉายแสง อย่างไรก็ตามพบว่าค่า ideality และค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ 28.77 และ 8.14 พิโคแอมแปร์ตามลำดับ ข้อบกพร่องผลึก(defect)ส่งผลกระทบต่อบริเวณใกล้เคียงของรอยต่อและการแอนนihil CdS เข้าไปเรียงกับฟิล์มบาง CZT จะส่งผลกระทบต่อการแพร่ของ CZT เข้าไปใน CdS เป็นอย่างมาก

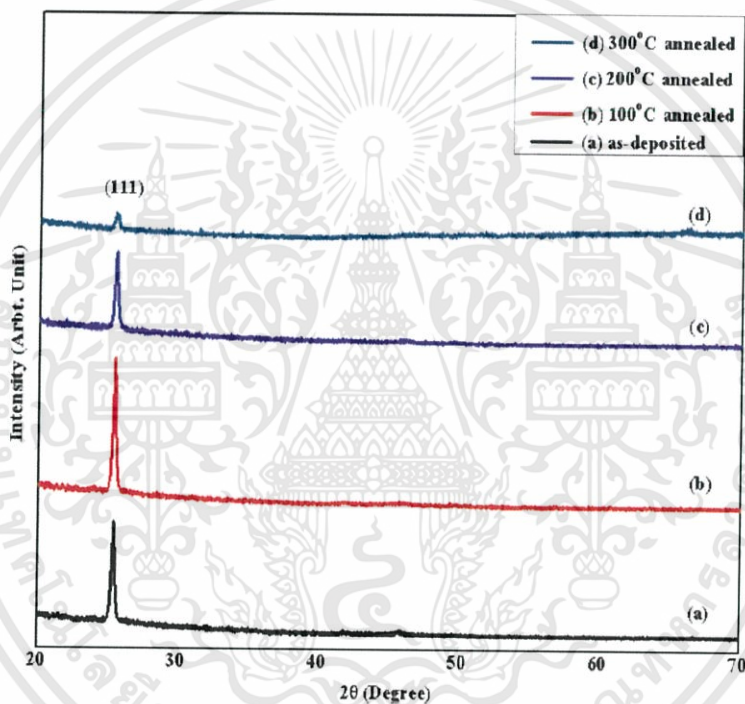


รูปที่ 2.30 แสดงกราฟ I-V characteristics ของรอยต่อ CdS/Cd_{44.33}Zn_{5.61}Te_{50.06} เมื่อปิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 ผลของการแอนนีสในอากาศที่มีผลต่อโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง รูปพรรณสัณฐาน และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdSe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และการแอนนีสด้วยความร้อนของฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์ที่อุณหภูมิ 100 °C, 200 °C และ 300 °C แสดงดังรูปที่ 1. ฟิล์มที่ถูกปลูกถูกแอนนีสด้วยความร้อนจะแสดงค่าพีคของกราฟที่ค่ามุมในช่วง 25.37–25.48° และระนาบที่โดดเด่นนี้จะสังเกตพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกับระนาบ(111)ซึ่งตรงกับแฟ้มข้อมูล JCPDS. การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นว่ามีการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นโครงสร้างแบบ zinc-blende.



รูปที่ 2.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์

ระยะห่างระหว่างระนาบ(d) และ ค่าคงที่โครงสร้างผลึก(a) สามารถคำนวณได้จากกฎการเลี้ยวเบนของ Bragg

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

เมื่อ h , k และ l คือ ดัชนีมิลเลอร์. การคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบจะมีความแตกต่างกันในช่วง 3.492–3.507 Å และพบว่าลดลงเล็กน้อยด้วยการแอนนีสด้วยความร้อนซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการปรับเปลี่ยนขนาดของเกรนและความเข้มของอัตรากิริยาระหว่างแผ่นฐานรองรับกับไอสารของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

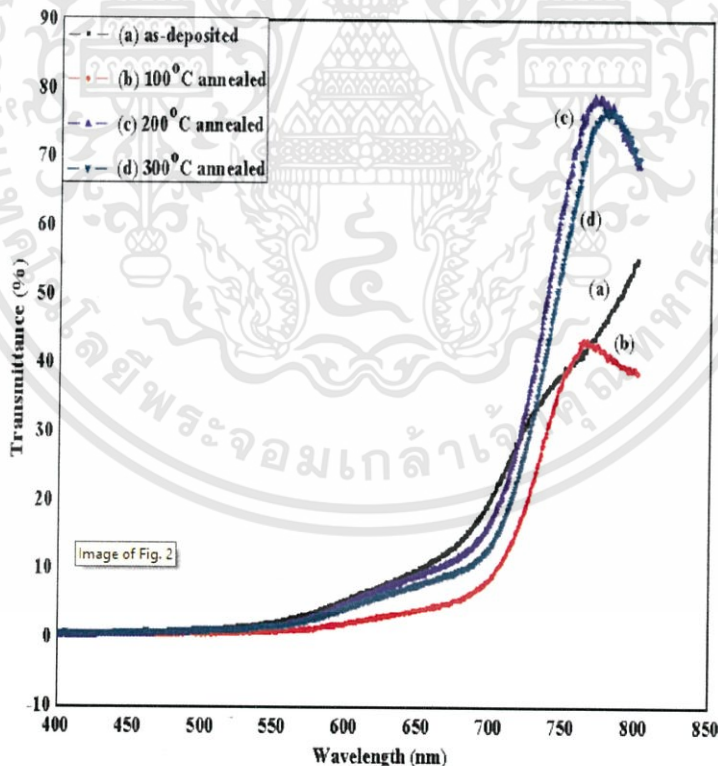
อะตอม. ค่าคงที่โคจรผลึกของฟิล์มบางที่สามารถคำนวณได้มีความสอดคล้องกับจุดพีคของกราฟที่โดดเด่นซึ่งพบว่ามีค่า 6.06 Å

ขนาดเกรนสามารถคำนวณได้จากสูตรของ Debye-Scherrer.

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

เมื่อค่า k คือ ค่าคงที่ของ Scherrer ซึ่งมีค่า 0.94. เมื่อ θ คือ มุมของ Bragg. λ คือค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์. β คือ ค่า FWHM ของกราฟ. ค่าขนาดของเกรนที่คำนวณมาได้จะแตกต่างกันตั้งแต่ 27.11 นาโนเมตร ไปจนถึง 34.03 นาโนเมตร ด้วยการแอนนัลในอากาศเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับค่า FWHM

สเปกตรัมการส่งผ่านแสงและฟิล์มบางแคดเมียมซีสไนด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนจะแสดงในรูปที่ 2. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการส่งผ่านมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความยาวคลื่นต่ำและจะเพิ่มขึ้น 40% ในช่วงแสงขาว. นอกจากนี้ยังพบว่าการส่งผ่านจะแตกต่างด้วยอุณหภูมิของการแอนนัลที่ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกัน.



รูปที่ 2.32 เปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซีสไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdS และ ZnTe ความบริสุทธิ์สูง 99.999% จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรือเซนเซอร์ต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย มีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดกระจกสไลด์
3. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคืบ
8. เต้าอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปัสสาวะ
 - 9.3 อะซิโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิห้อง SHIMADEN รุ่น PID FP93
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม (mask) ที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ใช้ในระบบสุญญากาศ
5. สารตั้งต้น CdS บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
6. สารตั้งต้น ZnTe บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
7. ช้อนตักสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้เวลาคลื่น 200-1000 นาโนเมตร

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

1. ระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมาก (cryostat)
2. LCR meter ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A
3. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมียี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP21 และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
5. เครื่องวัดอุณหภูมียี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟขนาดเล็กสำหรับต่อขั้วไฟฟ้า

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ องค์ประกอบต่างๆ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1 ตามลำดับ) เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1.0$)



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe จำนวน 1 กรัม ตามตารางที่ 3.1 บดคลุกเคล้าให้เข้ากันในครกกาเกตเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

มวลอะตอมของ	Cd = 112.4110 กรัม/โมล
	Zn = 65.3800 กรัม/โมล
	S = 32.0660 กรัม/โมล
	Te = 127.6000 กรัม/โมล
มวลโมเลกุลของ	CdS = 144.4760 กรัม/โมล
	ZnTe = 192.9800 กรัม/โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี x = 0.00

ใช้ CdS จำนวน 1 กรัม

กรณี x = 0.20

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก (CdS)}_{0.8}\text{(ZnTe)}_{0.2} &= [(144.4760 \times 0.8) + (192.9800 \times 0.2)] \\ &= 154.1768 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก (CdS)_{0.8}(ZnTe)_{0.2} จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.8)}{154.1768} \\ &= 0.7497 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.2)}{154.1768} \\ &= 0.2503 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.40

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก (CdS)}_{0.6}\text{(ZnTe)}_{0.4} &= [(144.4760 \times 0.6) + (192.9800 \times 0.4)] \\ &= 163.8776 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก (CdS)_{0.6}(ZnTe)_{0.4} จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.6)}{163.8776} \\ &= 0.5290 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.4)}{163.8776} \\ &= 0.4710 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.60

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก (CdS)}_{0.4}\text{(ZnTe)}_{0.6} &= [(144.4760 \times 0.4) + (192.9800 \times 0.6)] \\ &= 173.5784 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก (CdS)_{0.4}(ZnTe)_{0.6} จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.4)}{173.5784} \\ &= 0.3329 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.6)}{173.5784} \\ &= 0.6671 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x = 0.80$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } (\text{CdS})_{0.2}(\text{ZnTe})_{0.8} &= [(144.4760 \times 0.2) + (192.9800 \times 0.8)] \\ &= 183.2792 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $(\text{CdS})_{0.2}(\text{ZnTe})_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.2)}{183.2792} \\ &= 0.1577 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

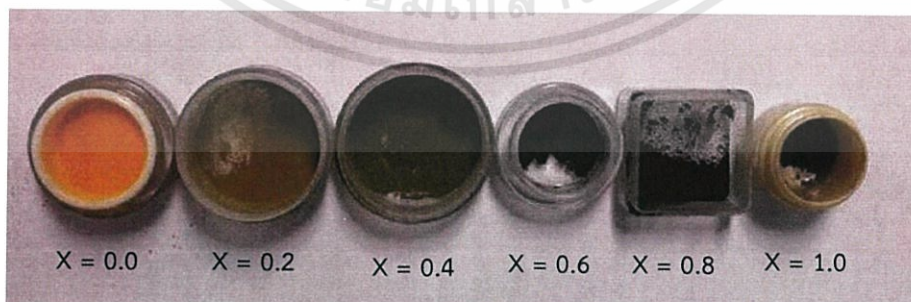
$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.8)}{183.2792} \\ &= 0.8423 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 1.00$

ใช้ ZnTe จำนวน 1 กรัม

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1.0$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x)	CdS (g)	ZnTe (g)
0.00	1.0000	0.0000
0.20	0.7497	0.2503
0.40	0.5290	0.4710
0.60	0.3329	0.6671
0.80	0.1577	0.8423
1.00	0.0000	1.0000



รูปที่ 3.1 สารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ที่ทำการบดคลุกเคล้าให้เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร นำไปเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุ
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้งโดยไม่ต้องถอดกระจกสไลด์ออกจากตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็วแล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบๆ
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
8. เมื่อกระจกสไลด์เย็นตัวเก็บใส่ถุงซิปล็อคแยกจากกันในแต่ละชิ้น เพื่อป้องกันกระจกสไลด์ชูดกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น

3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ

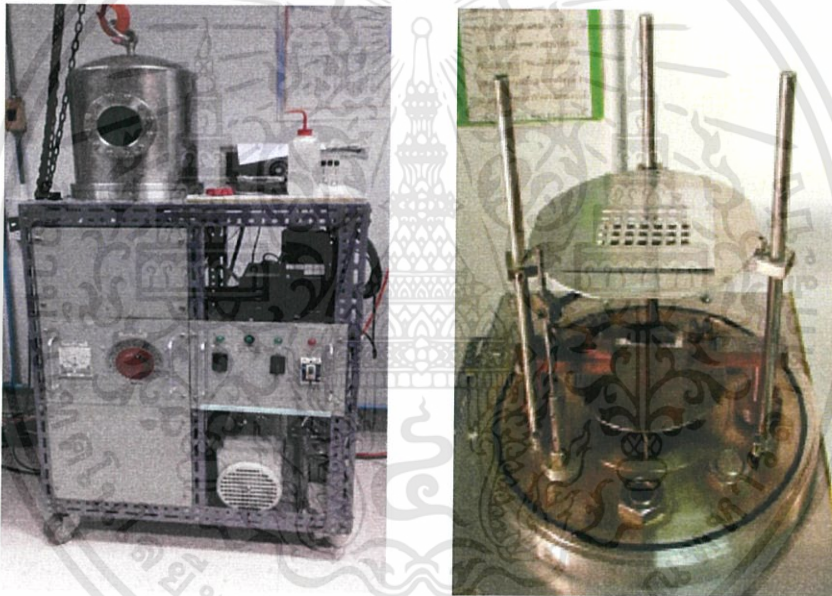
1. ใช้สาลีเช็ดผิวภายในภาชนะสุญญากาศและกระจกมองด้านหน้า ผิวหน้าหัววัดความหนาและชิ้นส่วนภายในอื่นๆ ด้วยอะซิโตน ยกเว้นโอริงบริเวณฐานของระบบสุญญากาศจะต้องเช็ดด้วยเมทานอลเพราะหากเช็ดด้วยอะซิโตนอาจทำให้โอริงเสียหายได้
2. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมด้วยอะซิโตนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง
3. ชั่งสารเคมีตามปริมาณ ดังนี้
 - การเคลือบฟิล์ม $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ตามองค์ประกอบ $x=1$ และ 0.2 ตักสารตั้งต้นให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้น (boat) ที่อยู่ในระบบสุญญากาศพอดี
 - การเคลือบฟิล์ม $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ตามองค์ประกอบ $x=0.4, 0.6, 0.8$ และ 1 ชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม

3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นให้อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 13 เซนติเมตร
2. ตักสารตั้งต้นใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ในระบบสุญญากาศพอดี
3. วางแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้นลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ทับลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบระบบวัดอุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบลมออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ $(3-4) \times 10^{-5}$ มิลลิบาร์
6. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 80-100 แอมแปร์ ในขณะที่สารตั้งต้นจะเริ่มระเหิด ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณสารตั้งต้นและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นสารตั้งต้นระเหิดจนหมด ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศและนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่างๆ ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$

3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมีมุม 2θ เริ่มจาก 20-70 องศา นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกขนาดของเกรน และตรวจสอบระนาบผลึกที่ปรากฏ

3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า นำข้อมูลที่ได้มาประมาณขนาดของเกรนและศึกษาลักษณะของชั้นฟิล์มจากภาพตัดขวาง

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ความต้านทานแผ่น (R_S) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (ρ_B) ด้วยวิธีสองขั้ว

1. ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วโดยใช้สายไฟขนาดเล็กสองเส้นมาทำให้เป็นเส้นตรงวางห่างกันโดยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และป้ายด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$
2. ต่อปลายลวดตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง Keithley รุ่น 236
3. โบนแอสแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง โดยขนาดของแรงดันโบนแอสจะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นนำค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ไปหาความต้านทานไฟฟ้า
4. หาค่า R_S จากสมการ $R_S = R \frac{W}{L}$ โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง, W คือ ความกว้างของฟิล์มบาง และ L คือ ระยะห่างระหว่างกาวเงินนำไฟฟ้าแต่ละเส้น
5. หาค่า ρ_B จากสมการ $\rho_B = R \frac{A}{d}$ โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง, A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า และ d คือ ความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

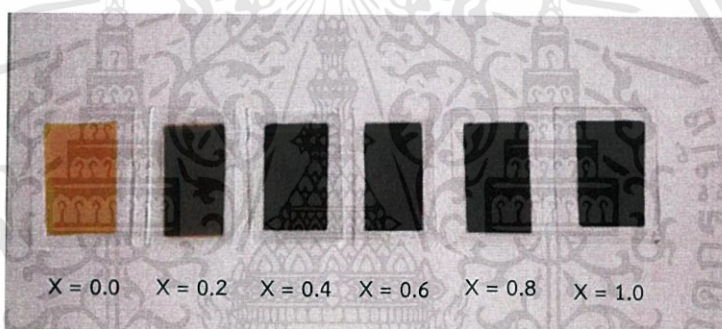
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0$ มีลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางเป็นสีเหลืองเข้ม และเมื่อ $x \geq 0.2$ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางมีลักษณะผิวหน้าดำเข้มขึ้นตามลำดับ ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

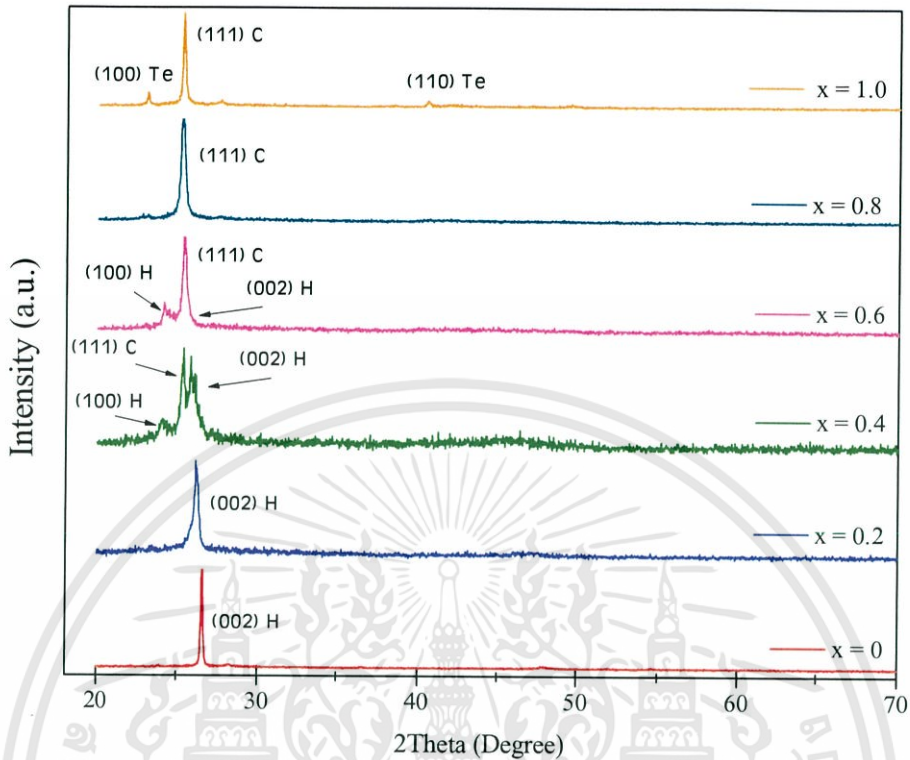
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมได้ไปทำการศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพีคความเข้มมาตรฐาน



รูปที่ 4.2 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$a_H = a / (2)^{1/2} \quad (4.1)$$

$$c_H = 2a / (3)^{1/2} \quad (4.2)$$

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($0.0 \leq x \leq 0.2$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เมื่อ ($0.4 \leq x \leq 0.6$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสผสมและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและเฮกซะโกนัล และเมื่อ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

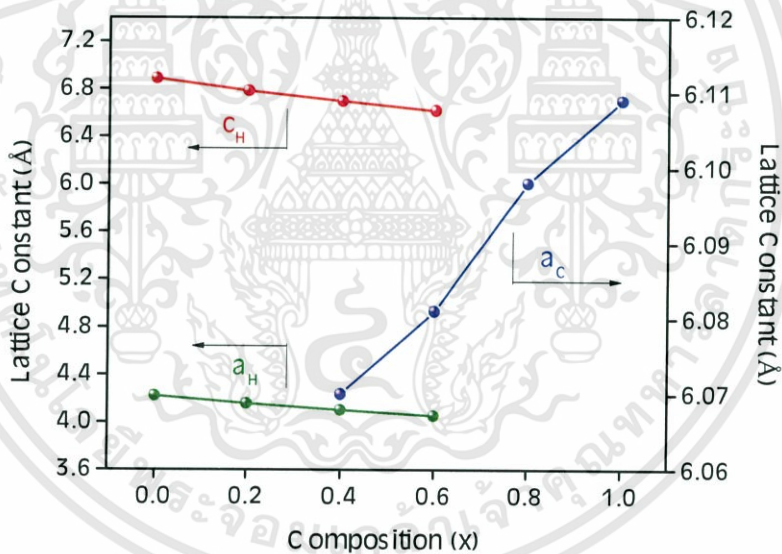
จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะพบว่ามีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แสดงให้เห็นดังรูปข้างต้น ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล จะสอดคล้องกับระนาบ (100) และ (002) ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก จะสอดคล้องกับระนาบ (111)

เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_H , c_H กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

จาก
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1,2,3,\dots \quad (4.3)$$

และ
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.4)$$

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกที่สอดคล้องกับระนาบ (111) แสดงว่า $h=1, k=1, l=1$ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (a_H, c_H) สามารถเขียนได้ในรูปของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (a) แทนได้



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_H , c_H และ a_c กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากกฎของแบรกก์ $2d\sin\theta = \lambda$ (4.5)

ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึกในระบบคิวบิก กับ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) และ ดัชนีมิลเลอร์(hkl) คือ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$$

แล้วจะได้ว่า $a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ (4.6)

หรือ $a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$

สำหรับระนาบ (111) และ $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ จะได้ว่า

$$a = \frac{1.5406\sqrt{3}}{2\sin\theta}$$

ส่วนระบบผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะได้ว่า

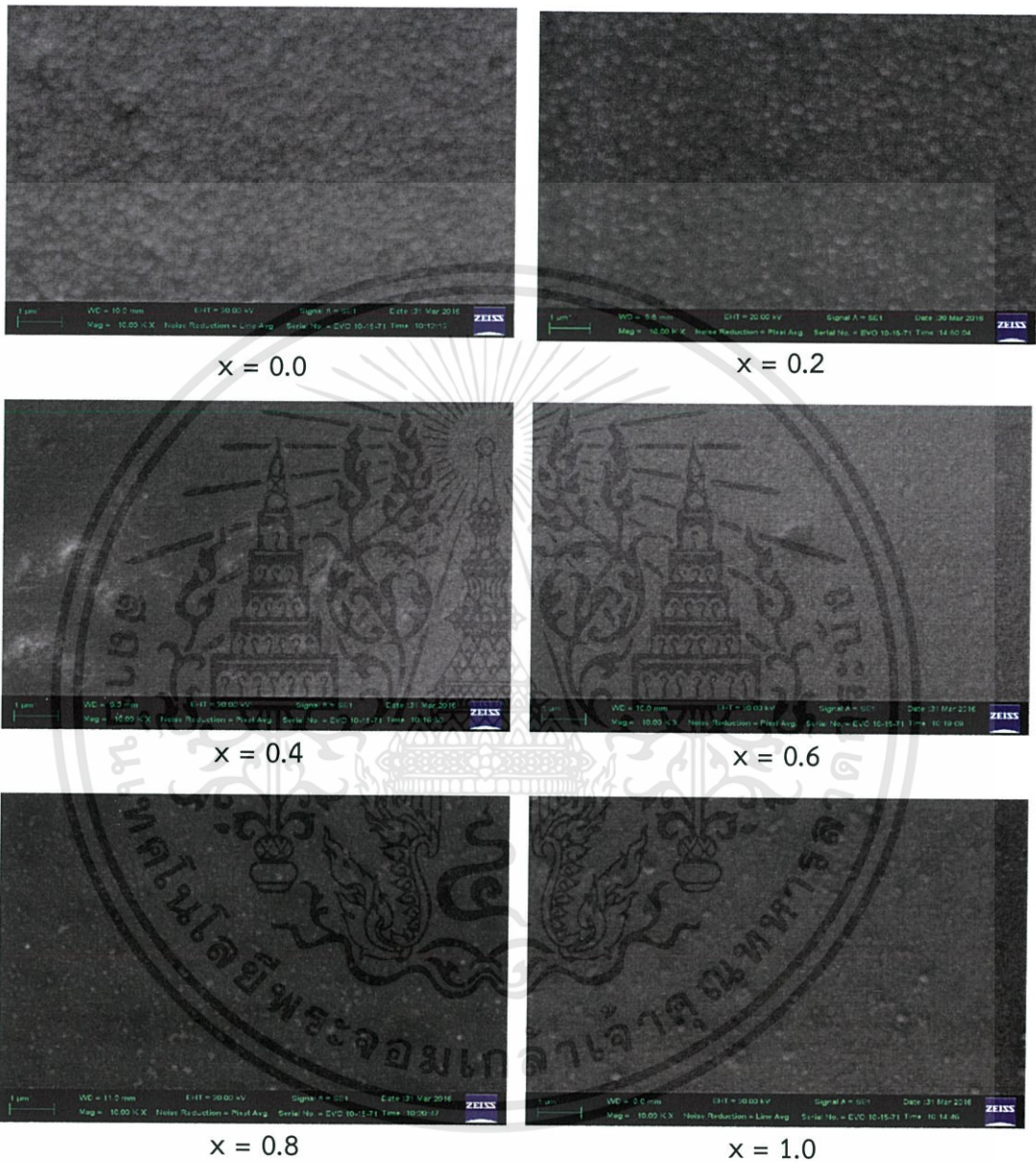
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Phase	2θ	(hkl)	Lattice Constant (Å)			Grain Size (nm)	Dislocation Density (line/m ²)	Strain
				a _c	a _h	c _h			
0.0	H (Single)	26.563	(002)	-	4.219	6.889	8.41	1.41×10 ¹⁶	2.84×10 ⁻³
		28.216	(101)						
		36.662	(102)						
		47.894	(103)						
		54.644	(004)						
0.2	H (Single)	26.131	(002)	-	4.155	6.785	4.33	5.32×10 ¹⁶	5.64×10 ⁻³
0.4	H	24.837	(100)	-	4.101	6.698	5.90	2.87×10 ¹⁶	4.21×10 ⁻³
		25.769	(002)						
	C	25.350	(111)	6.070	-	-	-	5.64×10 ⁻³	
0.6	H	25.450	(002)	-	4.054	6.620	4.50	4.94×10 ¹⁶	3.49×10 ⁻³
		24.127	(100)						
	C	25.356	(111)	6.081	-	-	-	5.56×10 ⁻³	
0.8	C (Single)	25.232	(111)	6.098	-	-	4.17	5.75×10 ¹⁶	6.12×10 ⁻³
1.0	C (Single)	25.275	(111)	6.109	-	-	7.48	1.79×10 ¹⁶	3.40×10 ⁻³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

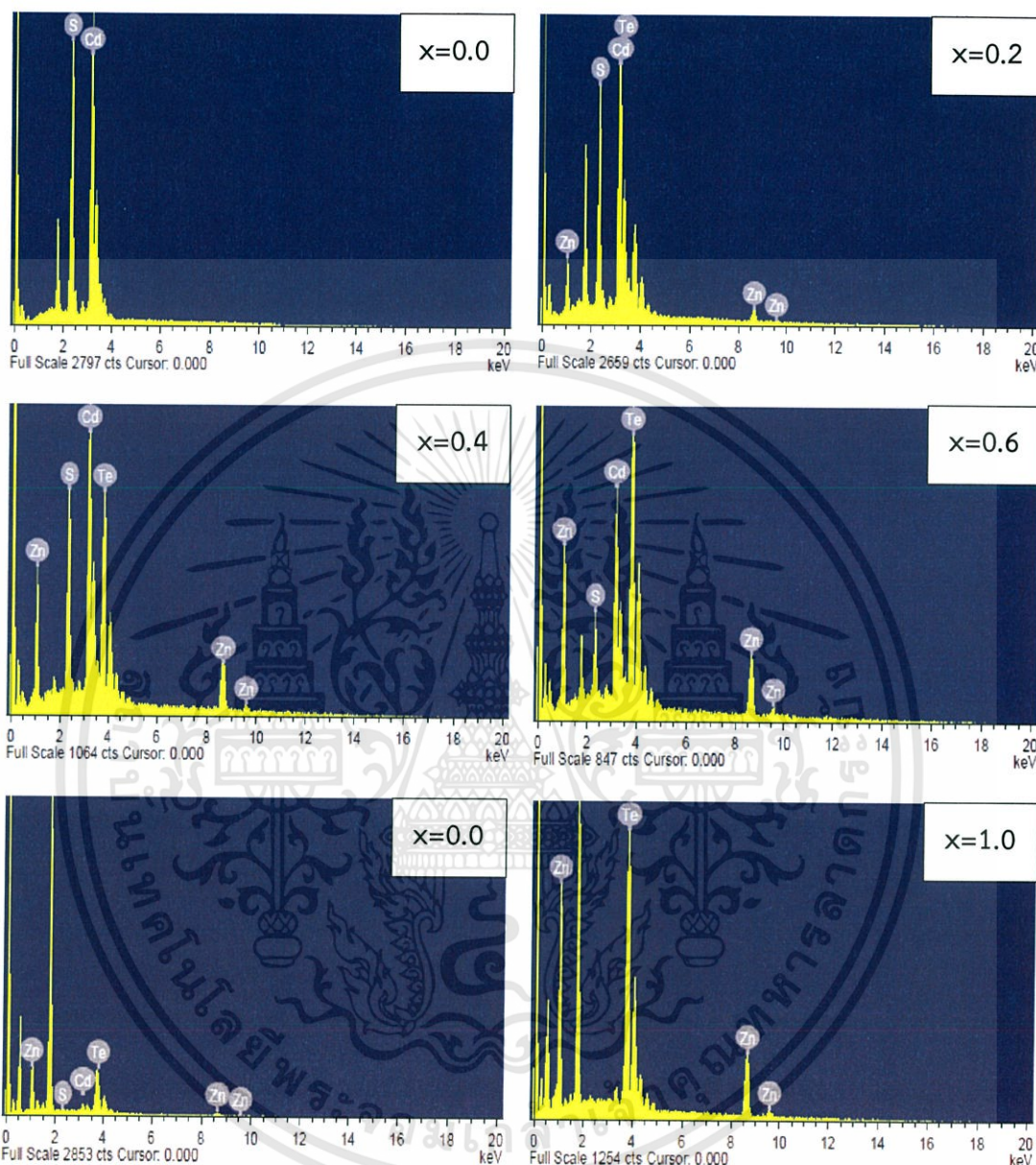
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

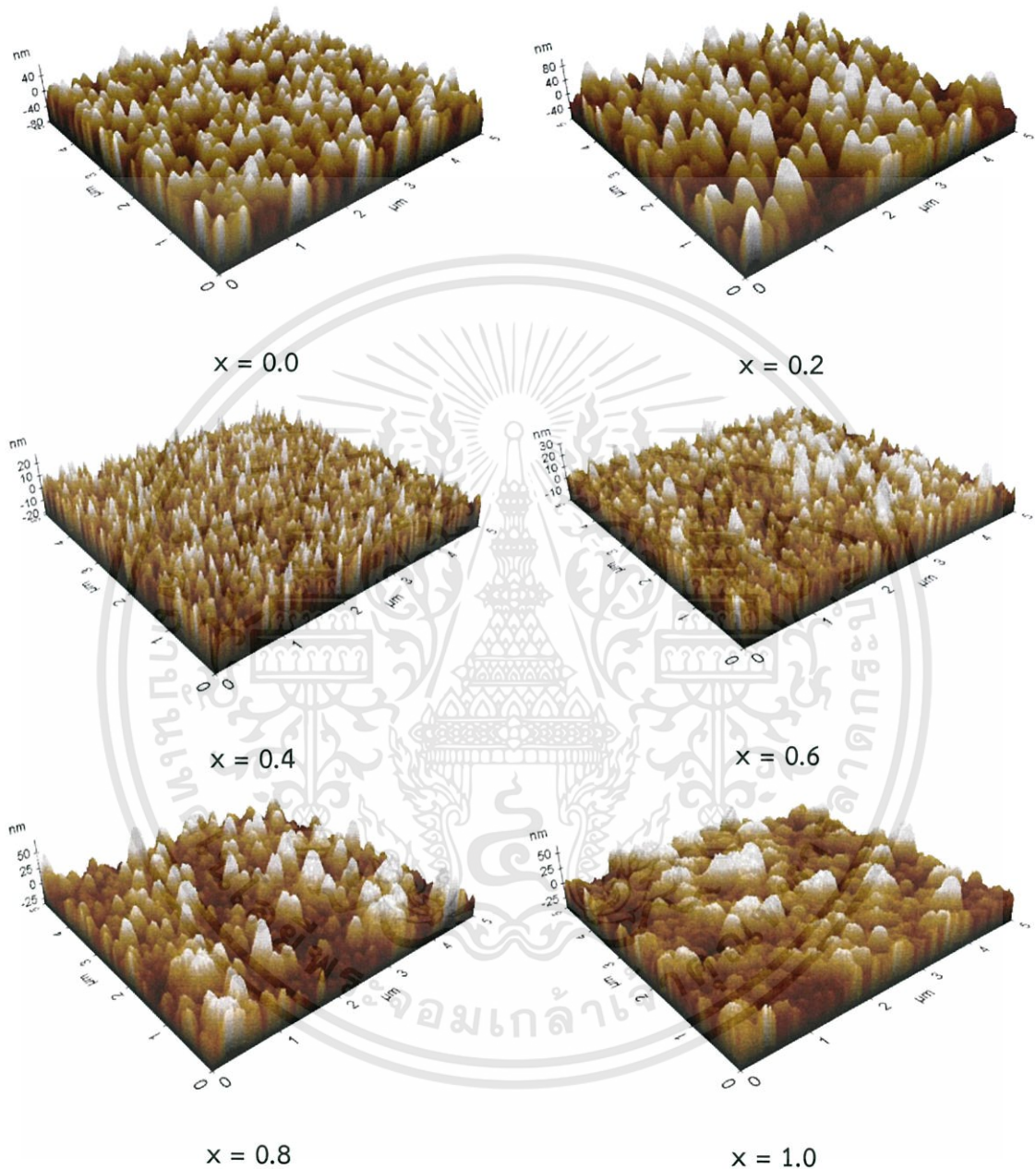
ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x) of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$	Elements							
	Cd		S		Zn		Te	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%
0.0	77.35	49.35	22.65	50.65	-	-	-	-
0.2	56.27	41.30	13.73	35.31	6.50	8.20	23.51	15.20
0.4	36.22	27.80	9.07	24.42	16.73	22.09	37.98	25.68
0.6	25.37	21.69	3.59	10.77	19.61	28.83	51.42	38.72
0.8	13.71	12.84	1.12	3.67	16.84	27.12	68.34	56.38
1.0	-	-	-	-	33.30	49.35	66.70	50.65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

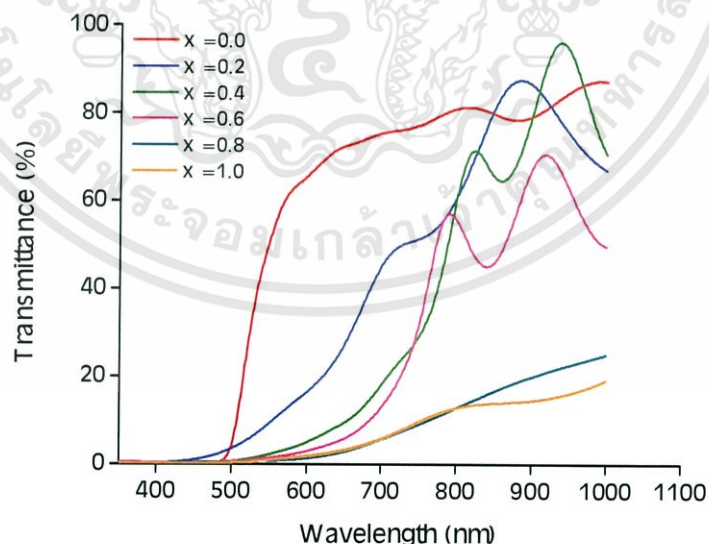
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x) of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$	Roughness (nm)	Grain Size (nm)
0.0	20.684	156
0.2	33.276	361
0.4	6.616	117
0.6	6.099	88
0.8	17.824	205
1.0	16.305	264

4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

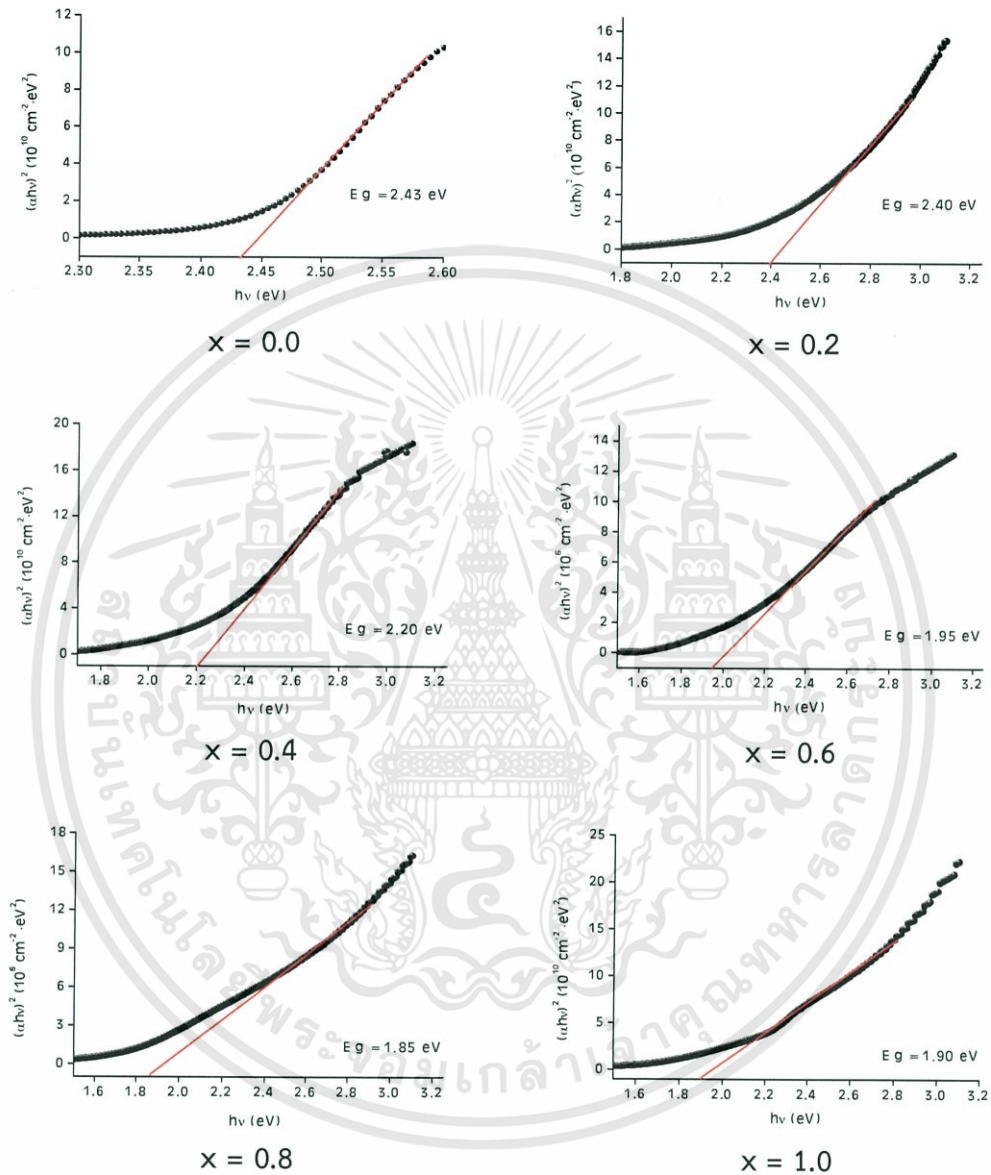
4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยทำการลากเส้นตรงการประมาณค่า(extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเชิงทางการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จาก การวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังความสัมพันธ์

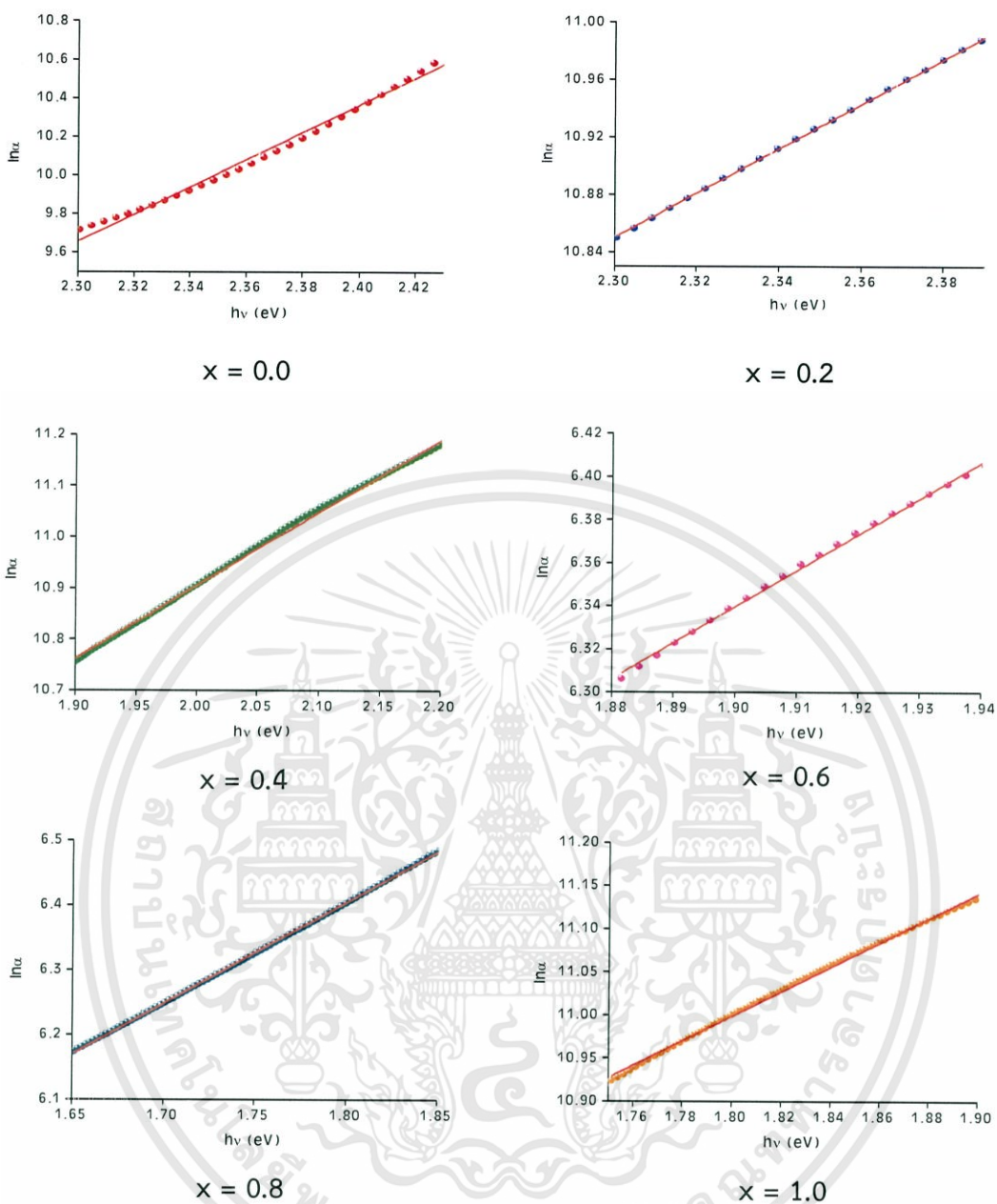
$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right)$$

เมื่อ E_0 คือ ความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก α คือ ค่าคงตัว

ดังนั้น E_0 จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ดังสมการ

$$\ln \alpha = \left(\frac{1}{E_0}\right) h\nu + \ln \alpha_0$$





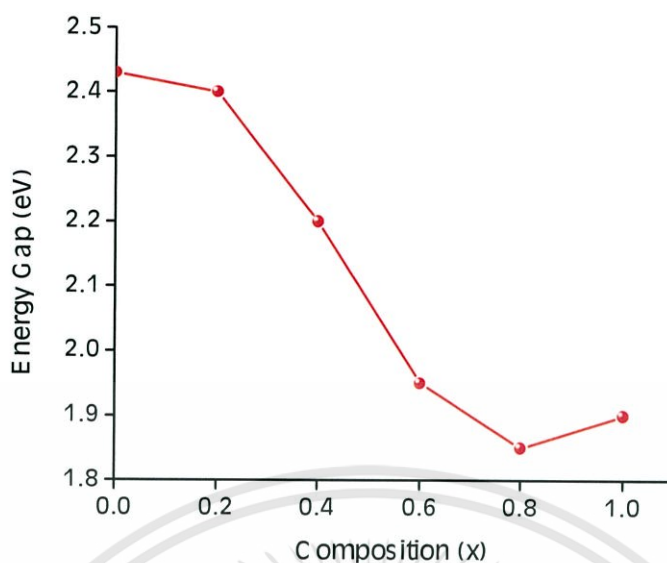
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) เพื่อหาค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่า ส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%

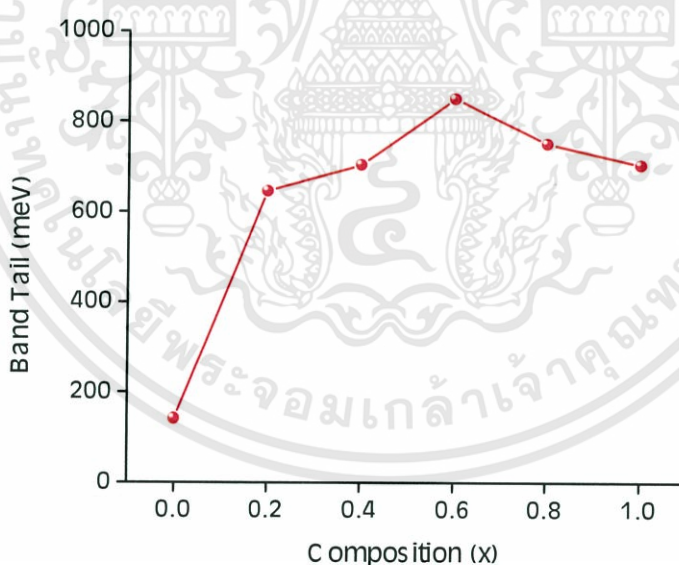
Composition (x) of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
0.0	2.43	141.65
0.2	2.40	646.04
0.4	2.20	703.59
0.6	1.95	850.00
0.8	1.85	750.32
1.0	1.90	703.99

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากรูปที่ 4.6 พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 750 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CdS และ ZnTe

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าเมื่อค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) เพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงตามลำดับ และค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม ($x = 1.0$) ดังรูปที่ 4.8

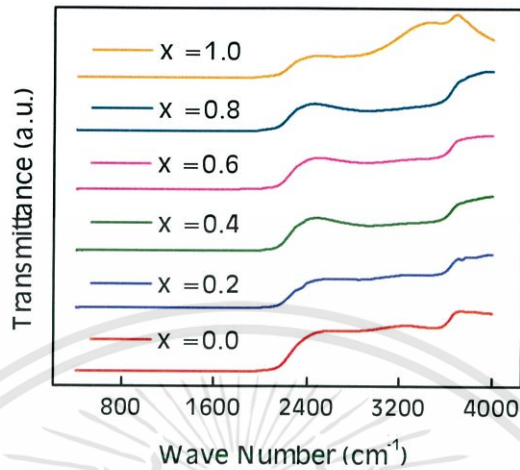


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

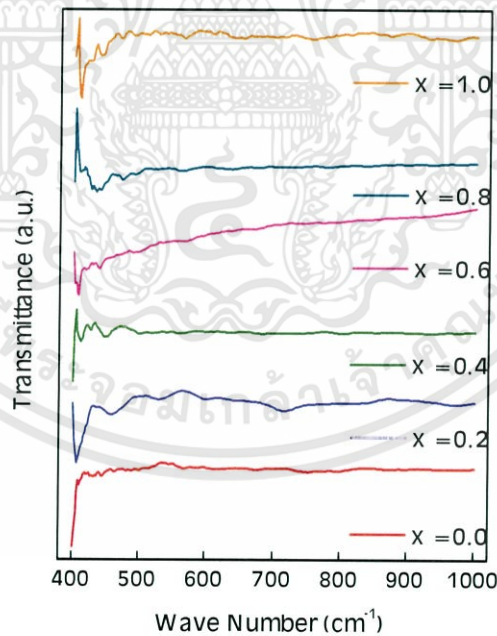


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition	Peaks of FTIR (cm^{-1})	Phase	Assignment	Reference
x=0.0 (CdS)	653.7	CdS	Cd - S	A.Mukhcrjcc, 2014
	675	CdS	Cd - S	Gautam Sheel Thool, 2015
	758	CdS	Cd - S	M.A. Islam,2015
	950	CH	C - H	Salyendra Kumar, 2013
x=0.2	720	CdS	Cd - S	this work
	1936	OH	H - O - H	M.Muthusamy, 2014
x=0.4	594	CdS	Cd - S	M.Muthusamy, 2014
	630	CdS	Cd - S	Mohammad H. Habibi, 2014
	652.85	CdS	Cd - S	Gautam Sheel Thool, 2014
	907	CdS	Cd - S	M.A. Islam, 2015
x=0.6	405	CdS	Cd - S	Satyendra Kumar, 2013
	1628.62	OH	O - H	Gautam Sheel Thool, 2014
x=0.8	440	ZnTe	Zn - Te	this work
x=1.0 (ZnTe)	560	ZnTe	Zn - Te	this work
	760	ZnTe	Zn - Te	Qeemat Gul, 2013
	970	ZnTe	Zn - Te	this work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

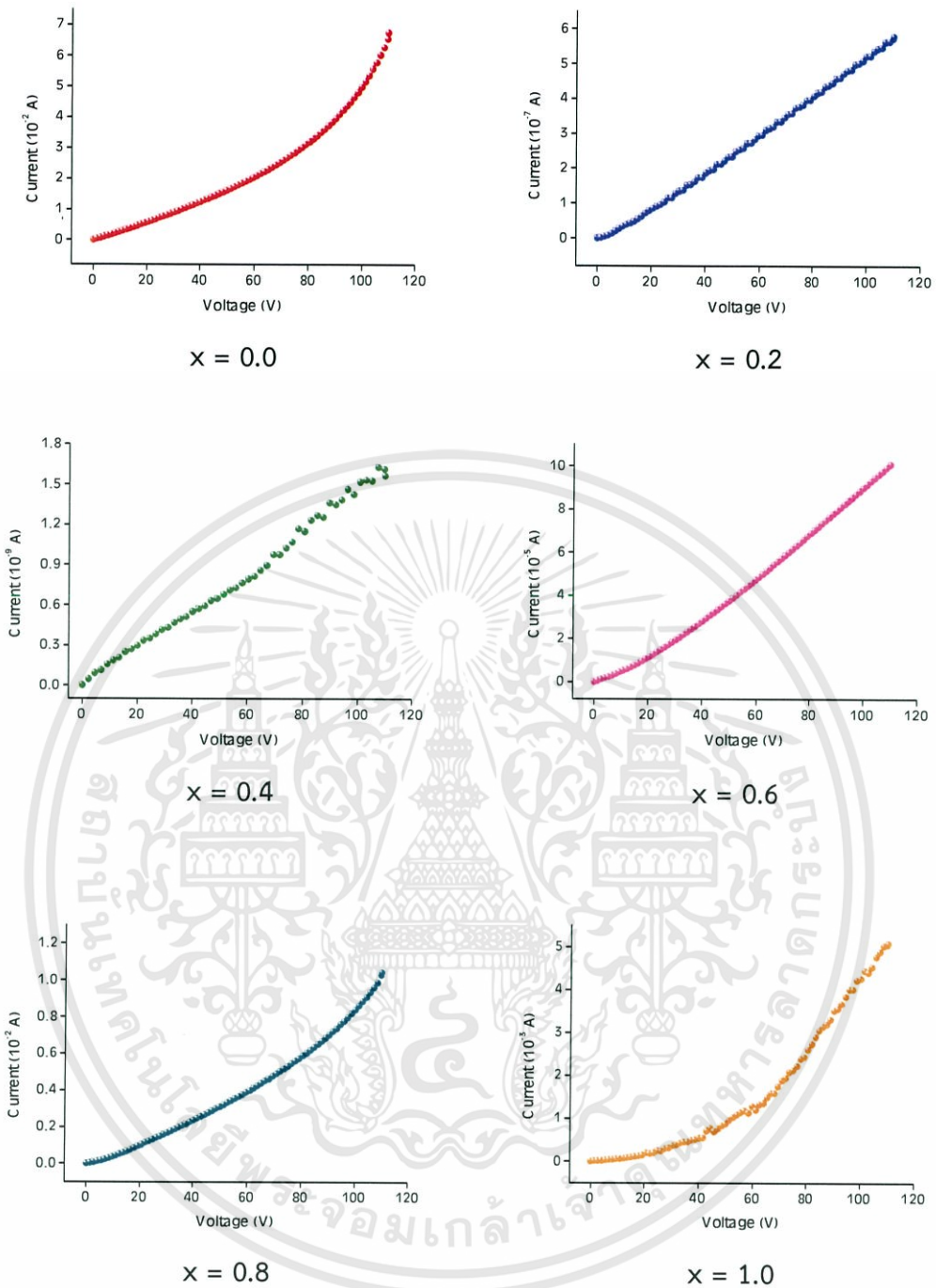
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและ ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 120 องศาเซลเซียส ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบาง เพื่อใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ

4.4.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีพื้นที่หน้าตัดเป็น A มีความหนา l มีความต้านทาน R และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{RA}{l}$$

โดยที่ R คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า

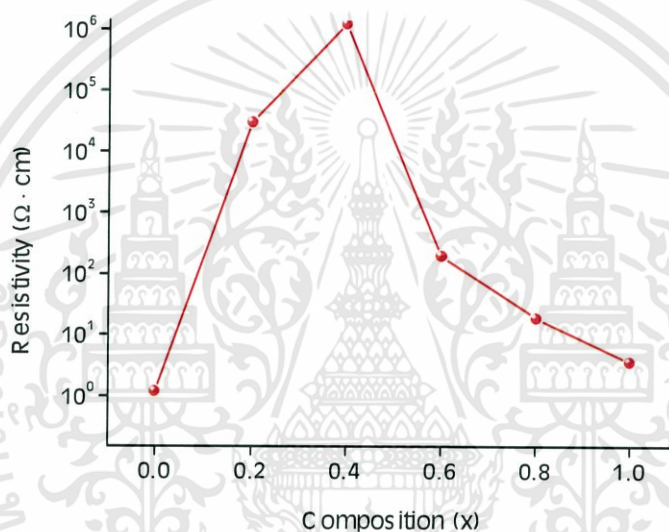


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

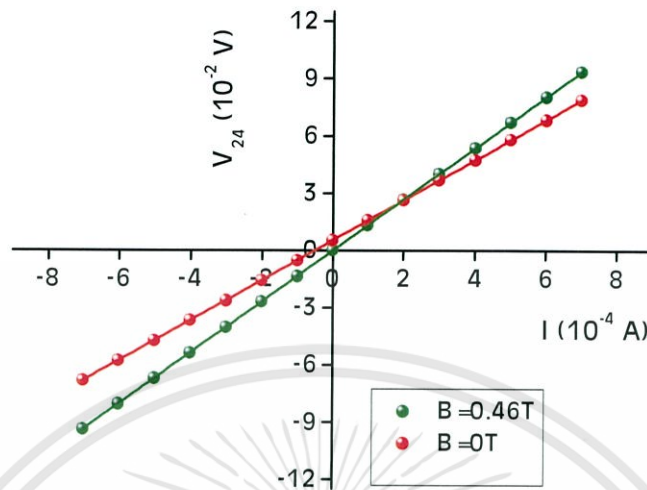
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)
0.0	1.18
0.2	3.04×10^4
0.4	1.18×10^7
0.6	1.96×10^2
0.8	18.81
1.0	3.63

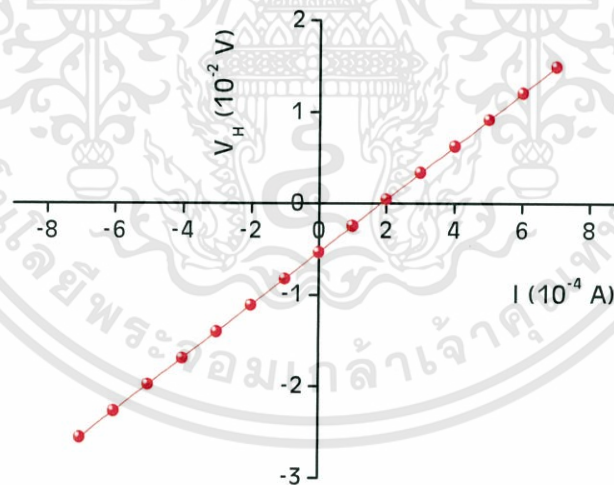


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

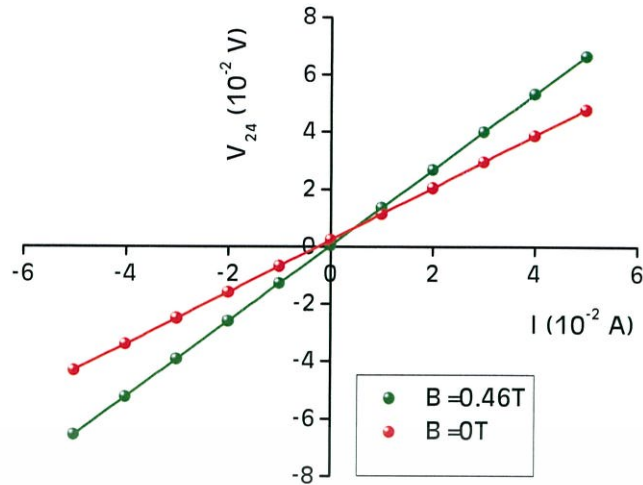
4.4.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางขวางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



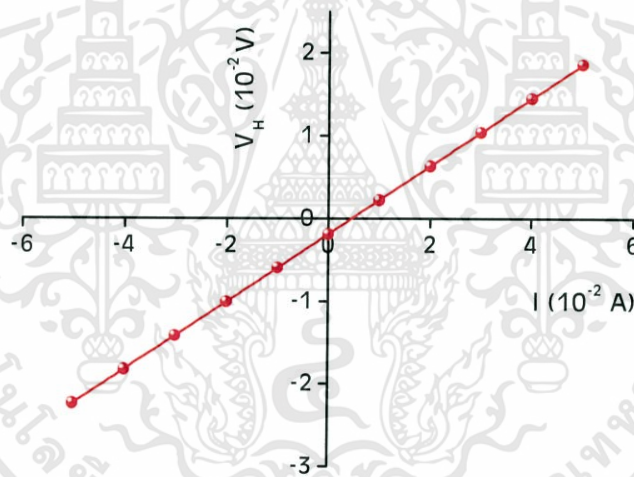
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



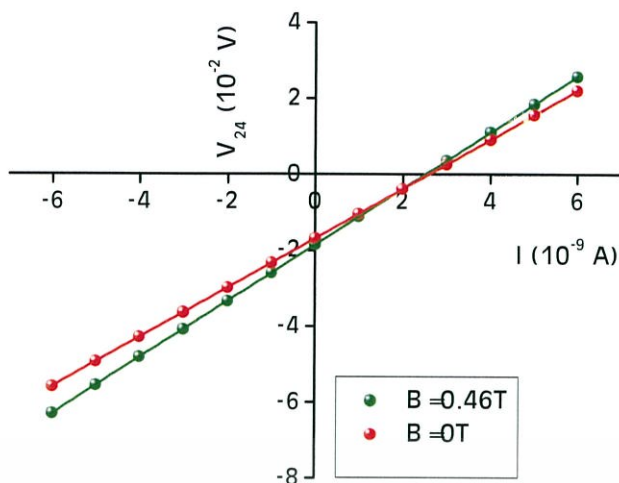
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



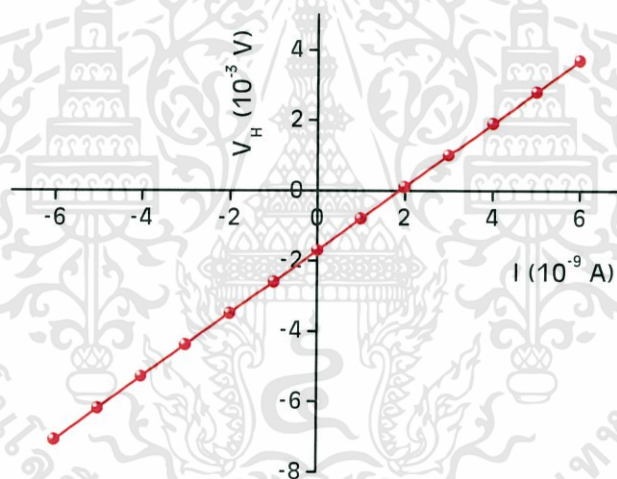
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



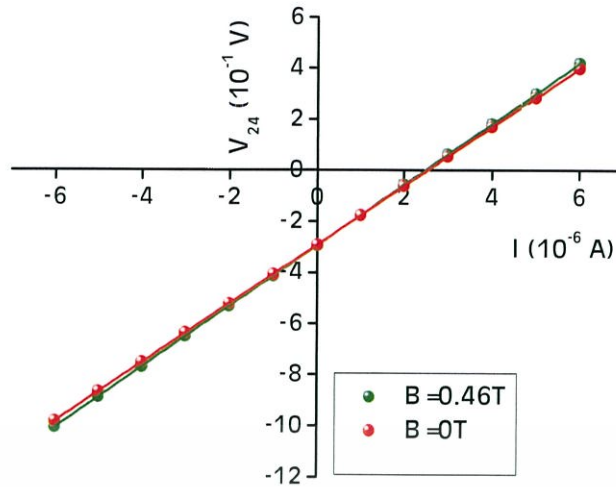
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



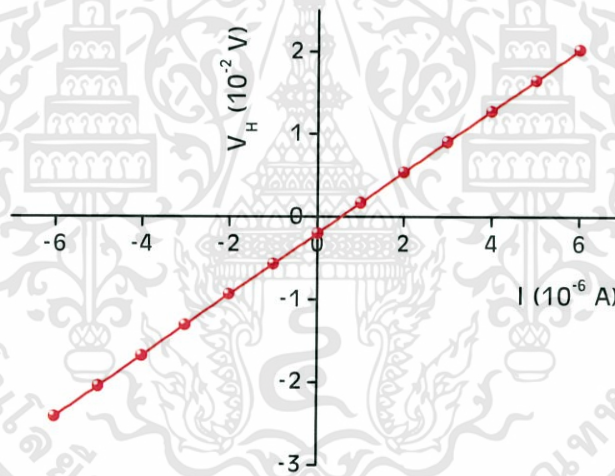
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



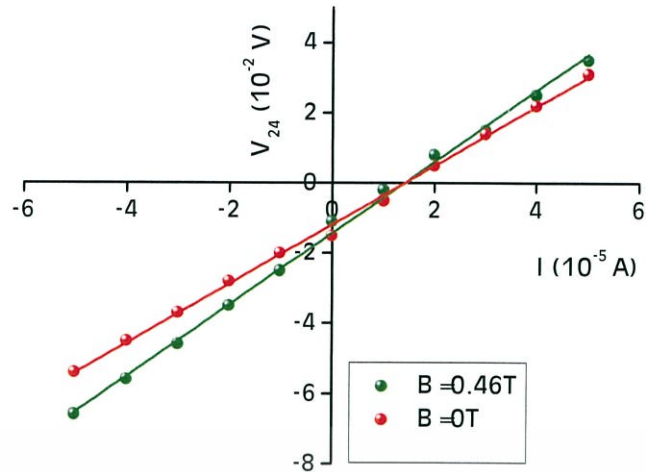
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



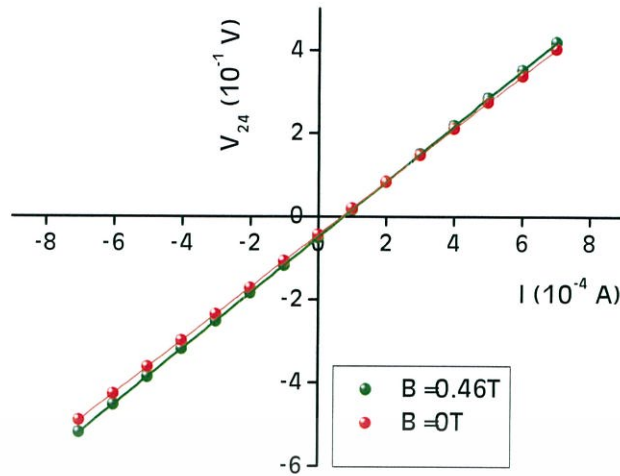
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



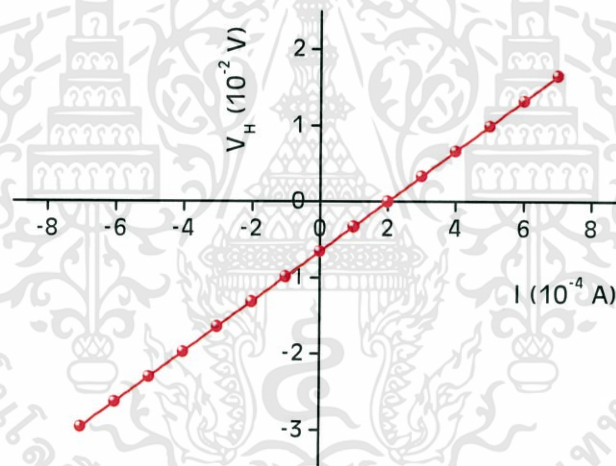
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}\rho &= R_{sh}d \\ &= (1.08 \times 10^3)(1 \times 10^{-4}) = 1.08 \times 10^{-1} \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}\end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}R_H &= (10^8) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= (10^8) \left(\frac{0.0029}{10^{-4}} \right) \left(\frac{10^{-4}}{4600} \right) \\ &= 63 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูอมบ์}\end{aligned}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}n &= \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(63)} \\ &= 9.9 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}\end{aligned}$$

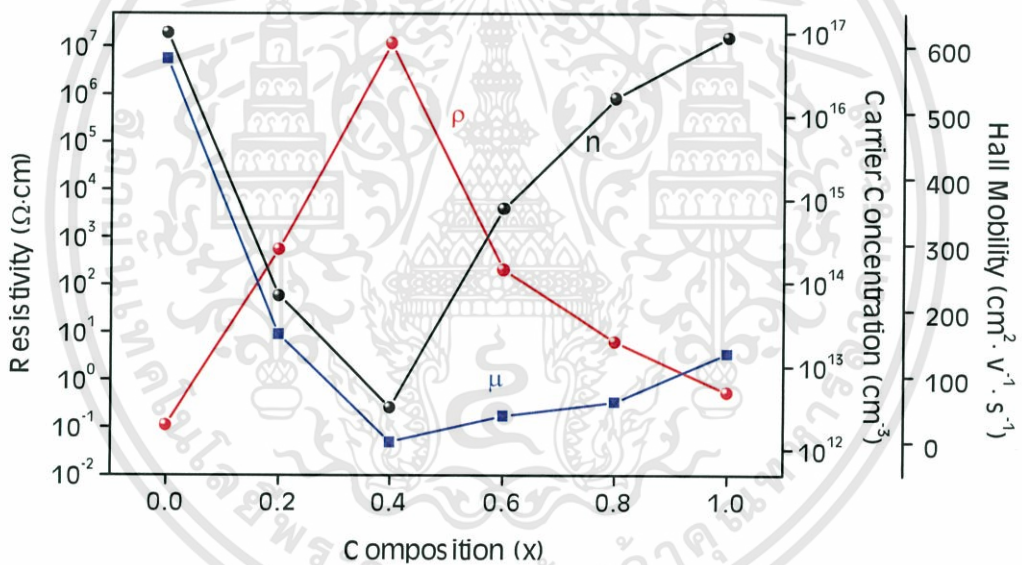
และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mu_H &= \frac{R_H}{\rho} = \frac{(63)}{(1.08 \times 10^{-1})} \\ &= 5.81 \times 10^2 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)}\end{aligned}$$

และจากค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นทั้งชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type)

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^3/C)	Electron Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Type
0.0	0.11	63.04	9.91×10^{16}	5.81×10^2	n
0.2	5.45×10^2	8.91×10^4	7.01×10^{13}	1.63×10^2	n
0.4	1.18×10^7	1.96×10^6	3.19×10^{12}	0.17	n
0.6	2.04×10^2	8.04×10^3	7.77×10^{14}	39.36	p
0.8	6.31	3.91×10^2	1.59×10^{16}	61.99	p
1.0	0.54	71.74	8.71×10^{16}	1.33×10^2	p



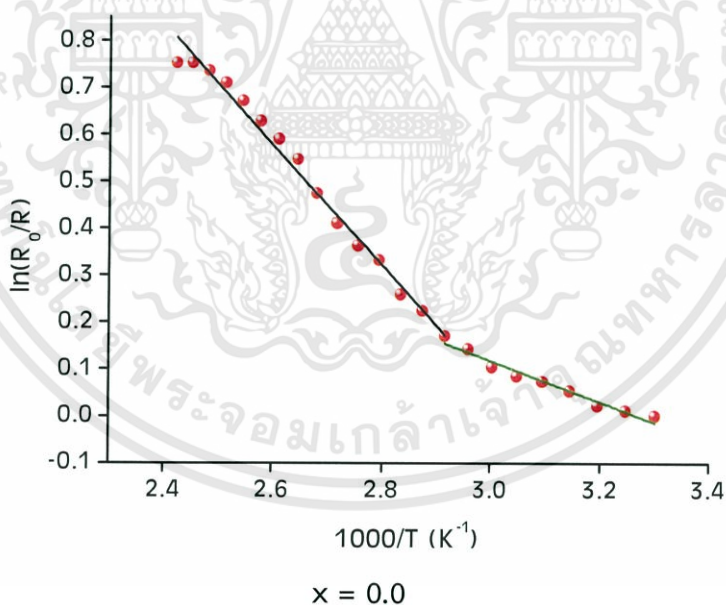
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

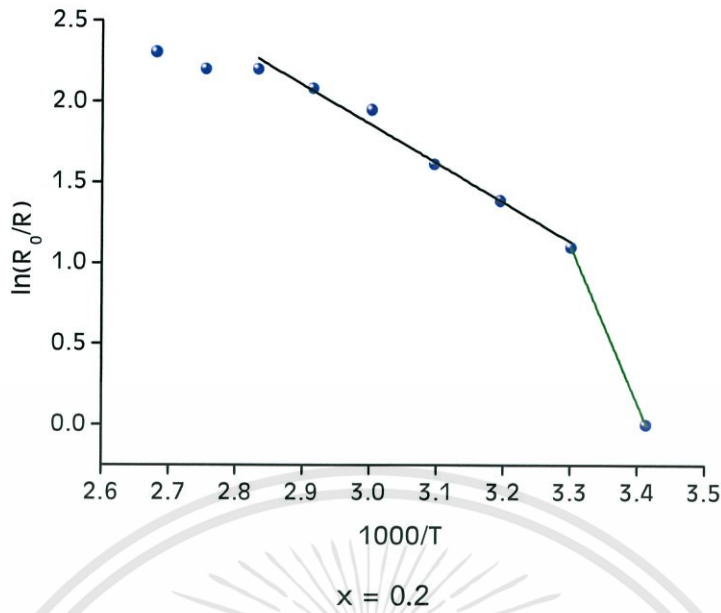
จากรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 และจากตารางที่ 4.8 เป็นผลการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น(E_a) จะมีเพียงค่าเดียวซึ่งจะเป็นค่ากัมพวงศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกัมพวงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้จากสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-\phi_b}{kT}\right]$$

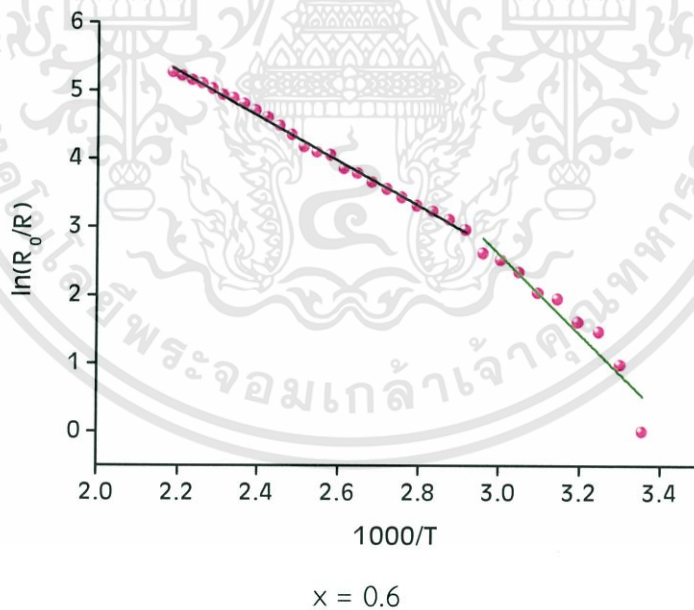
จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น กัมพวงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

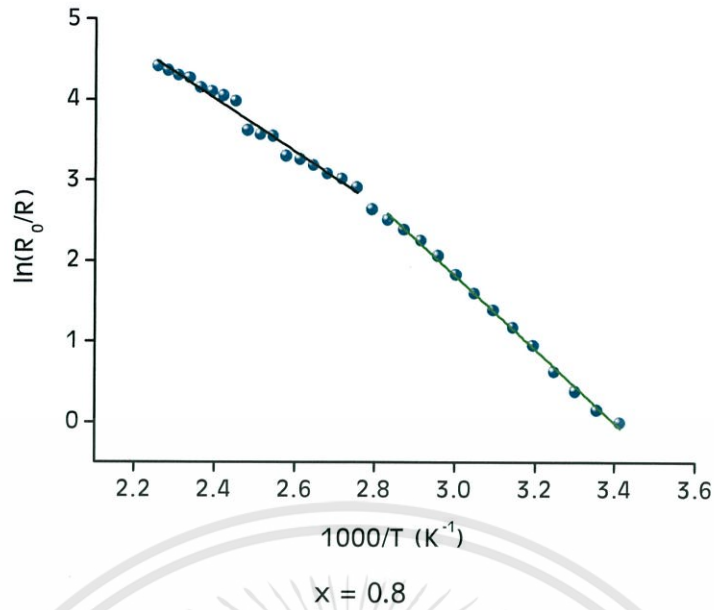


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

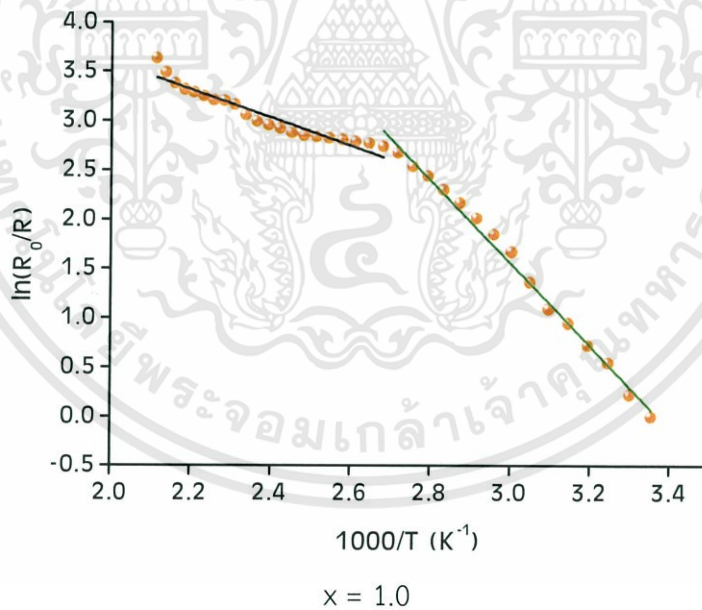


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



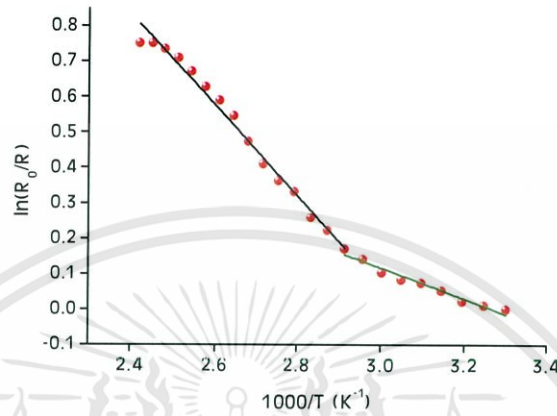
รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เราสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้ดังนี้

เขียนกราฟ $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ vs $\frac{1000}{T}$



รูปที่ 4.34 แสดงตัวอย่างการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right)$$

$$\frac{R}{R_0} = \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{KT}$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{1,000k} \left(\frac{1000}{T}\right)$$

$$(Slope) = \frac{-E_a}{1,000K}$$

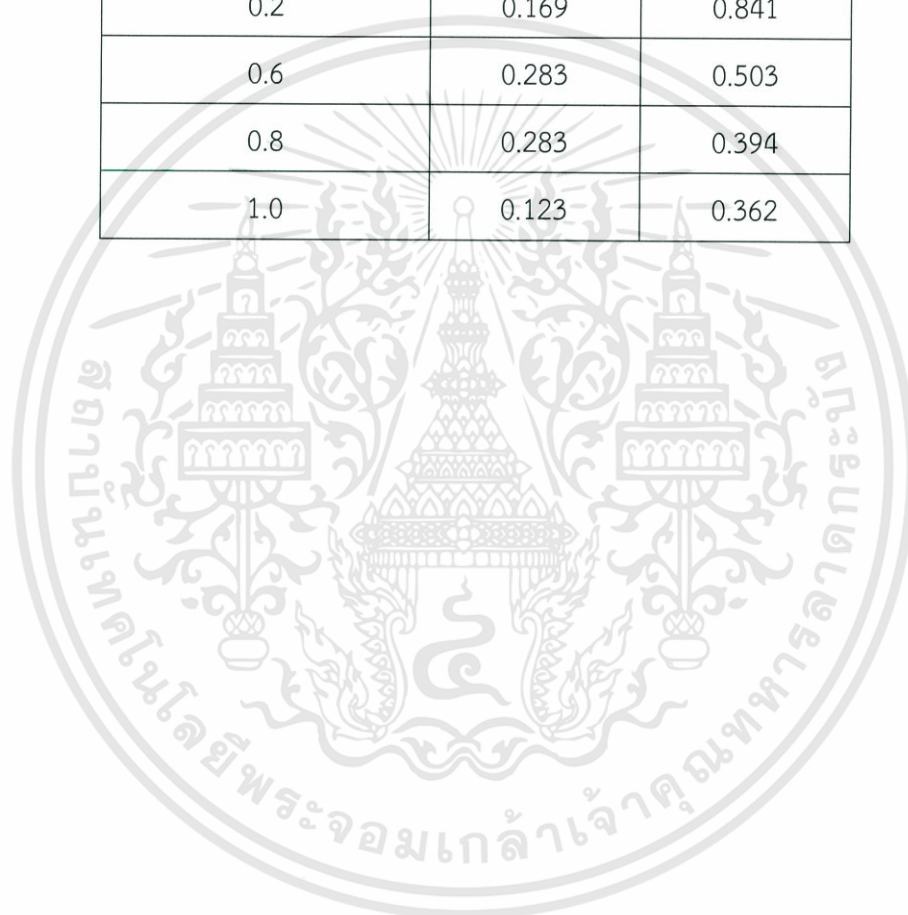
$$E_a = 1,000K(Slope) \text{ หน่วยเป็น J}$$

$$= \frac{1,000(1.38 \times 10^{-23})(-1.283)}{(1.6 \times 10^{-19})} = 0.111 \text{ eV}$$

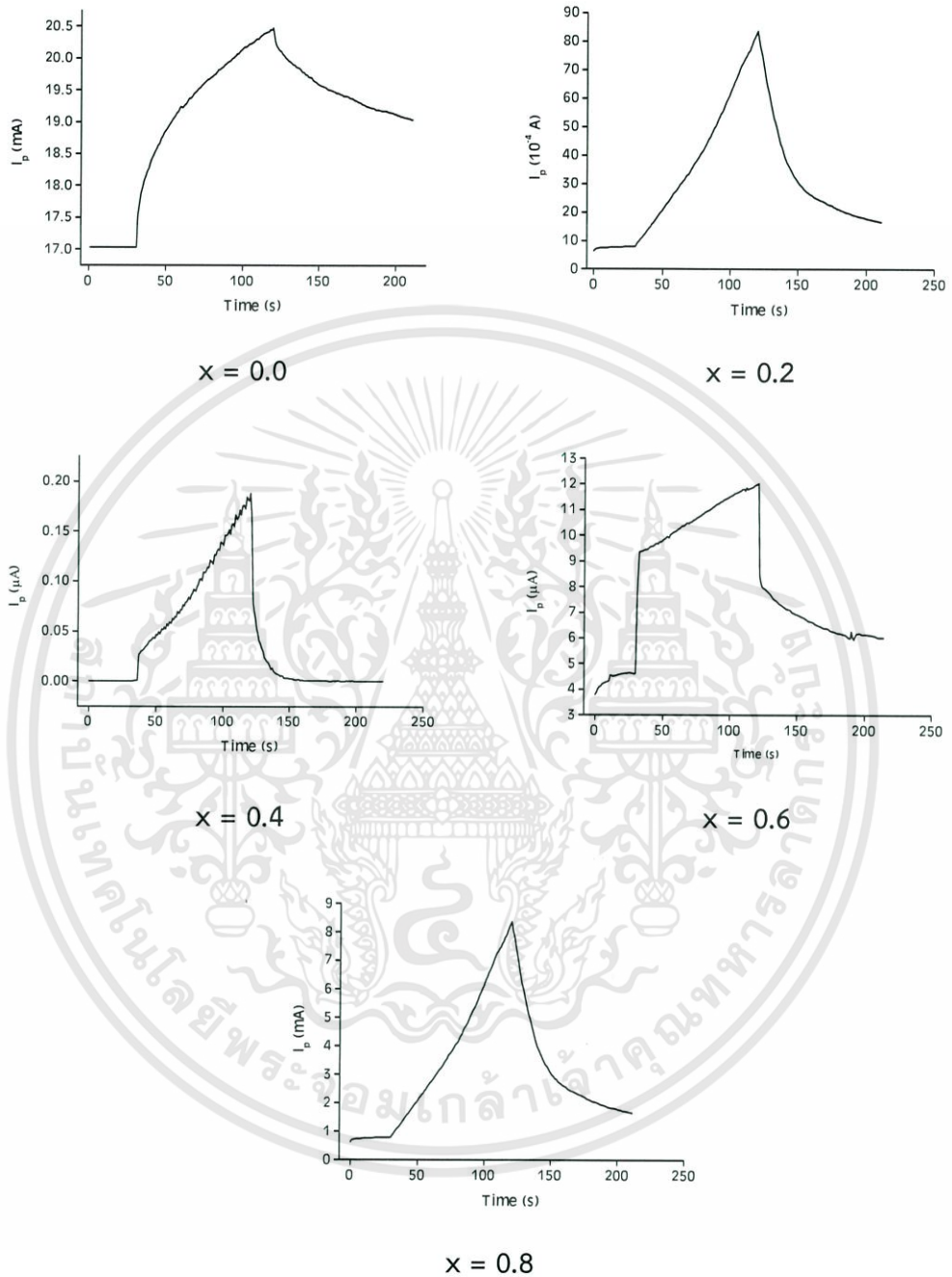
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

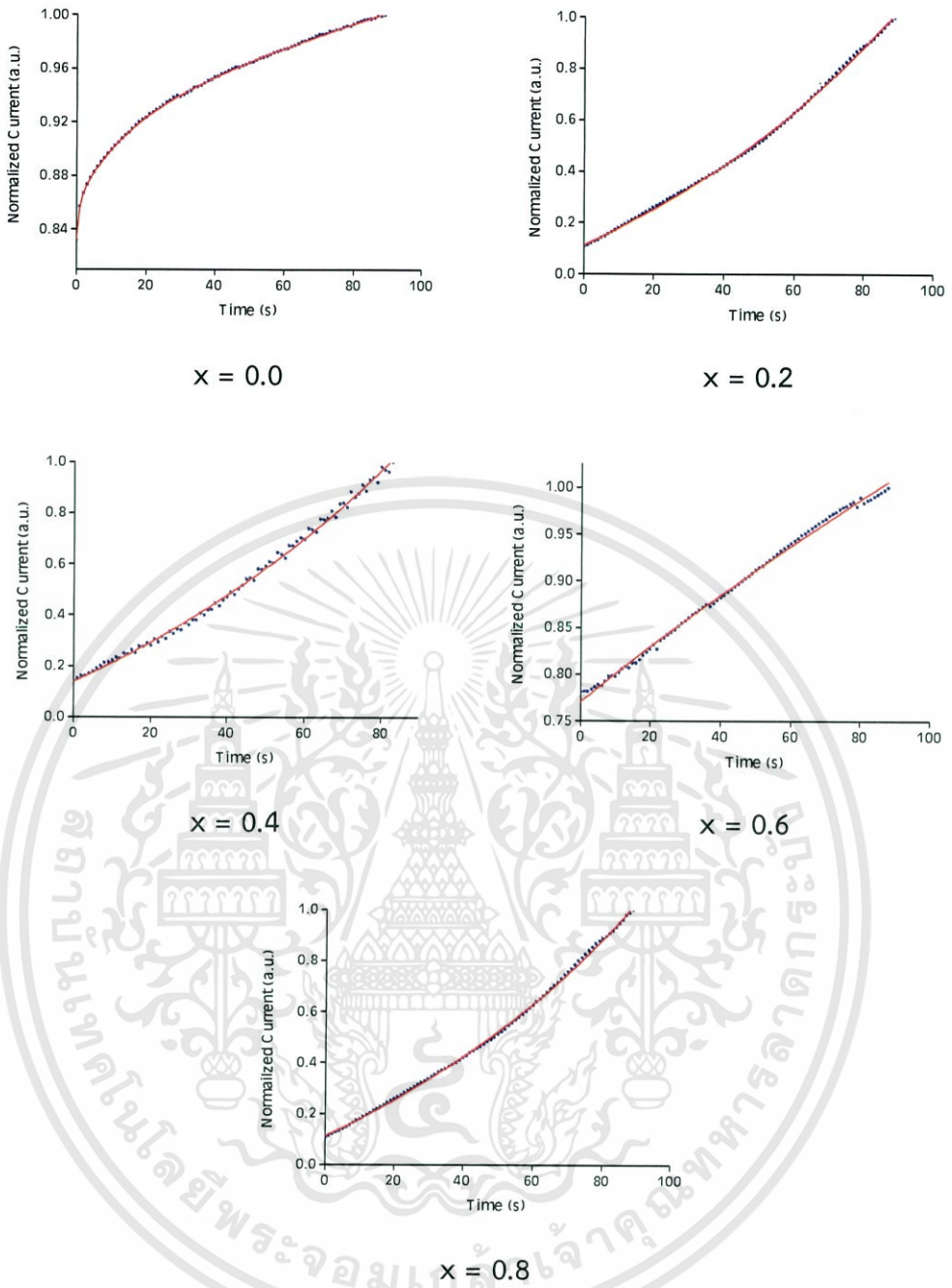
Composition(x) of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$	Activation Energy (eV)	
	Ea1	Ea2
0.0	0.111	0.038
0.2	0.169	0.841
0.6	0.283	0.503
0.8	0.283	0.394
1.0	0.123	0.362



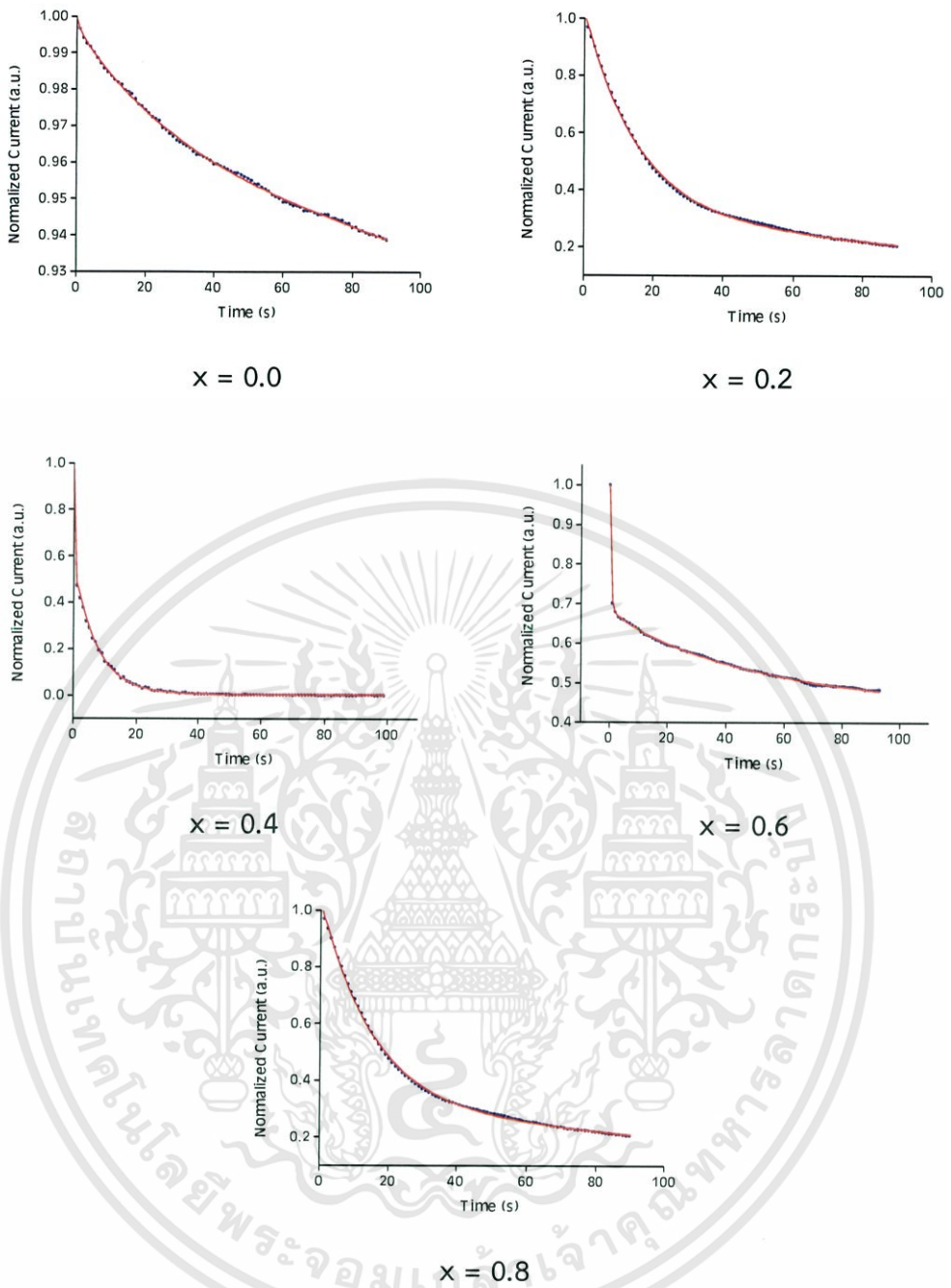
4.4.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.37 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.38 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	Rise Time (s)					Decay Time (s)					
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term
0.0	τ_{ri}	63.51	260.21	471.37	836.44	1147.83	480.48	843.49	1879.33	2596.86	-
	A_{ri}	0.0295	-2.9990	12.4000	-12.7800	0.0375	3.7390	-42.0800	-16.7900	-0.8145	-
	β	-	-	-	-	0.6788	-	-	-	0.9957	-
0.2	τ_{ri}	27.66	48.15	97.66	152.91	-	26.37	37.49	86.64	101.01	152.32
	A_{ri}	0.0214	-0.0869	0.0802	0.0012	-	0.1053	-0.3480	-0.6011	0.3913	0.3452
	β	-	-	-	0.6463	-	-	-	-	-	-0.0040
0.4	τ_{ri}	20.33	40.71	48.74	68.76	-	8.31	18.35	-	-	-
	A_{ri}	1.58×10^{-7}	-2.64×10^{-6}	2.70×10^{-6}	1.43×10^{-7}	-	8.73×10^{-8}	-9.89×10^{-9}	-	-	-
	β	-	-	-	0.6832	-	-	-	-	0.8924	-
0.6	τ_{ri}	360.67	289.97	318.52	559.13	-	36.15	147.69	315.48	686.93	-
	A_{ri}	-0.0252	0.0503	-0.0256	1.49×10^{-6}	-	-2.06×10^{-6}	7.34×10^{-5}	1.66×10^{-4}	4.77×10^{-6}	-
	β	-	-	-	0.7793	-	-	-	-	0.4135	-
0.8	τ_{ri}	18.58	28.35	47.30	61.52	-	26.37	39.16	98.84	147.76	-
	A_{ri}	0.0456	-0.1058	0.0896	-0.0173	-	0.4287	-1.0870	-4.3580	1.9150	-
	β	-	-	-	0.7392	-	-	-	-	1.0050	-

ตารางที่ 4.9 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากกราฟสถานะพาหะไฟฟ้าเชิงแสงต่ออันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Rise Time (s)					Decay Time (s)					
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term	Term
0.0	σ_i	3.84×10^{12}	3.96×10^{12}	4.05×10^{12}	4.17×10^{12}	4.25×10^{12}	4.54×10^{12}	4.52×10^{12}	4.46×10^{12}	4.41×10^{12}	-
	I_i	1.71×10^{-2}	1.77×10^{-2}	1.81×10^{-2}	1.86×10^{-2}	1.90×10^{-2}	2.03×10^{-2}	2.02×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.97×10^{-2}	-
0.2	σ_i	5.82×10^{11}	7.47×10^{11}	1.01×10^{12}	1.43×10^{12}	-	5.25×10^{12}	4.09×10^{12}	2.61×10^{12}	2.47×10^{12}	1.93×10^{12}
	I_i	9.12×10^4	1.17×10^3	1.58×10^3	2.24×10^3	-	8.23×10^3	6.41×10^3	4.09×10^3	3.87×10^3	3.03×10^3
0.4	σ_i	7.89×10^9	1.01×10^{10}	1.24×10^{10}	1.76×10^{10}	-	2.15×10^{10}	3.21×10^9	-	-	-
	I_i	2.51×10^8	3.22×10^8	3.94×10^8	5.59×10^8	-	6.83×10^8	1.02×10^8	-	-	-
0.6	σ_i	2.46×10^{10}	-	2.47×10^{10}	2.71×10^{10}	-	2.23×10^{10}	2.15×10^{10}	1.97×10^{10}	1.75×10^{10}	-
	I_i	9.30×10^6	-	9.35×10^6	9.12×10^5	-	8.42×10^6	8.13×10^6	7.43×10^6	6.62×10^6	-
0.8	σ_i	1.82×10^{12}	2.23×10^{12}	3.16×10^{12}	4.16×10^{12}	-	1.69×10^{13}	1.35×10^{13}	6.69×10^{12}	6.36×10^{12}	-
	I_i	8.67×10^4	1.06×10^3	1.50×10^3	1.98×10^3	-	8.03×10^3	6.41×10^3	3.18×10^3	3.03×10^3	-

ตารางที่ 5.0 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากกราฟสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินการวิจัยของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางและวัสดุสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าลักษณะของฟิล์มบาง CdS ($x=0$) มีสีส้มเหลือง และเมื่อมีการเพิ่มเศษส่วนโดยโมล (x) ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของ ZnTe ลักษณะสีของฟิล์มที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นและเป็นสีดำที่เราเพิ่มปริมาณของ ZnTe 100 เปอร์เซ็นต์ ($x=1$) ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นฐานรองรับ ยึดเกาะกันได้ดีไม่มีการหลุดร่อน

5.1.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนปรากฏอยู่ในช่วง $2\theta = 25.20 - 26.60$ องศา โดยฟิล์มบางกรณีพิเศษที่เศษส่วนโดยมวล ($x \leq 0.2$ และ $x \geq 0.8$) ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยว (single phase) และกรณีพิเศษที่เศษส่วนโดยมวล ($0.4 \leq x \leq 0.6$) ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นเฟสผสม (mix phase) ในกรณีพิเศษที่เศษส่วนโดยมวล ($x \leq 0.2$) จะพบพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H ที่ปรากฏอย่างเด่นชัด ที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.4$) พบพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (100)H และ (111)C ปรากฏเด่นชัดขึ้นมาในขณะที่ พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H ยังคงปรากฏเด่นชัดอยู่ ที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.6$) พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (100)H และ (111)C ยังคงปรากฏอยู่ดังเดิม ในขณะที่พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H เริ่มหายไป และที่เศษส่วนโดยมวล ($x \geq 0.8$) พบว่าพีคการเลี้ยวเบนของระนาบอื่นหายไปเหลือเพียงแต่พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111)C ปรากฏเด่นชัด จากค่าโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าที่ เศษส่วนโดยมวล ($0 \leq x \leq 0.6$) Zn^{2+} เข้าแทนที่ Cd^{2+} มีบทบาทมากกว่า Te^{2-} เข้าแทนที่ S^{2-} ส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (แบบเฮกซะโกนัล) มีแนวโน้มลดลง และที่เศษส่วนโดยมวล ($0.4 \leq x \leq 1$) Te^{2-} เข้าแทนที่ S^{2-} มีบทบาทมากกว่า Cd^{2+} เข้าแทนที่ Zn^{2+} ส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (แบบคิวบิก) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกขนาดเล็ก มีความสะอาดสูง และสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้ และจากการศึกษาลักษณะของผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถเห็นลักษณะของเกรนว่ามีขนาดที่ค่อยๆ ลดลงไปตามจนถึงที่ $x = 0.6$ และกลับมาขยายขึ้นหลังจากนั้น

5.1.3 ผลของการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ZnTe เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเราพบว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าส่วนหางของแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง ซึ่งเราสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานก็คือข้อบกพร่องของโครงสร้างนั่นเอง และจากการวัดการส่งผ่านแสงย่านอินฟราเรดของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางจะมีนัยสำคัญในช่วง เลขคลื่น $400-1000 \text{ cm}^{-1}$ โดยจะพบว่ามีโมเลกุลของอะตอม CdS และ ZnTe จะมีการสั่นแบบ Stretching Vibration

5.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnTe 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก CdS ($x=0$) ซึ่งเป็น n-type และ ZnTe ($x=1$) เป็น p-type เมื่อเพิ่มปริมาณของ ZnTe จนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าปริมาณพาหะระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันหรือหักล้างกัน ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อยลงส่งผลให้ฟิล์มบางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.4$) และที่จุดนี้เราพบว่าฟิล์มบางเริ่มเปลี่ยนจาก n-type เป็น p-type และจากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นอย่างดี

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 150 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ 2 ช่วง

ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อการฉายแสงลงบนฟิล์มบาง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางที่ $x=0.6$ จะมีการตอบสนองต่อแสงที่ดีกว่าที่เศษส่วนโดยมวลอื่นๆ และทำการศึกษาต่อโดยคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะ ซึ่งจากผลที่ได้ นั้น ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{10}-10^{12}$ ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสควรระวังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกไม่สม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ติดทั้งแผ่น
2. ต้องการทำความสะอาดระบบระบายสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
3. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบระบายสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับ เพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจ่ายกระแสแก่แผ่นฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องตามที่ต้องการ และจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
4. หัววัดความหนาของฟิล์มบางควรอยู่ระดับเดียวกับหน้ากากอะลูมิเนียมเพื่อที่จะได้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ใกล้เคียงกับกับความเป็นจริงมากที่สุด
5. การระบายสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้



เอกสารอ้างอิง

- ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. การศึกษาข้อสัมผัสไอโธรมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ขวัญกมล สุวรรณเทศ. 2557. กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} .
ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมได
ซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับ
ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า
ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์ รายงานวิจัยเสนอ
ต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดย
วิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธี
ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเป็คเตอรืงเพื่อประยุกต์ใช้
ในเซลล์แสงอาทิตย์รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2543. การเตรียม
และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงาน
วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2545. การเตรียม
และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงาน
วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ชนิภรณ์ จุไรสง, ธิรญา โชติธนนันท์. 2556. การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพพันธุ์ของ
ฟิล์มบางCdS/CuO. ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง. ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ
คอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. ภาควิชา
ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยี
ของเซลล์แสงอาทิตย์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางตีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมพลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิത്യ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิത്യ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิത്യ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียนติ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีสปีดเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียนติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นิโลบล แก้วพวง, นิคานาถย์ ชัยชนะ, ชุติกายุจน์ ชุมลา . 2554. ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuCrO₂. ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรรณภา จำเนียรพีช. 2555. การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรารณณ์ บุญเกื้อ. 2554. สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .

- เอกชัย วิลามาศ. 2552. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ รอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CdTe.วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อัฐพร อริยฤทธิ์. 2553. การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธ์ Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/CuAlO₂.ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิสร นพรุจิกุล. 2555. สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS กับ CuAlO₂. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Bouchard, R.J. and Gillson, J.L. 1968. "Hexagonal Indium Tungsten Bronze." *Inorganic Chemistry*. 7(5) : 969-972.
- Cullity, B.D. 1956. **Element of X-Ray Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company.
- Gautam Sheel Thool, K. Sraveen, Ajaya Kumar Singh, Ujjwal Pal, Surya Prakash Singh. 2015. "Cowrie-shell architectures: Low temperature growth of Ni doped CdS Film." *Journal of Alloys and Compounds*. 649 (2015) 553-558
- Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors." *App. Phys. Lett.* 87 : 243512-1-243512-3.
- Islam, M.A., F. Haque, K.S. Rahman, N. Dhar, M.S. Hossain, Y. Sulaiman, N. Amin. 2015. "Effect of oxidation on structural, optical and electrical properties of CdS thin films grown by sputtering." *Optik*. 126 (2015) 3177-3180
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- Habibi, M.H. and Rahmati, M.H. 2014. "Fabrication and characterization of ZnO@CdS core-shell nanostructure using acetate precursors: XRD, FESEM, DRS, FTIR studies and effects of cadmium ion concentration on band gap." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and iomolecular Spectroscopy*. 133 (2014) 13-18
- Mukherjee, A., B. Satpati, S.R. Bhattacharyya, R. Ghosh, P. Mitra. 2014. "Synthesis of nano crystalline CdS thin film by SILAR and their characterization." *Physica E*. 65(2015)51-55
- Muthusamy, M., S. Muthukumar. 2015. " Effect of Cu-doping on structural, optical and Photoluminescence properties of CdS thin films." *Optik*. 126 (2015) 5200-5206
- Richard, A.P. and Edwards, D.D. 2004. "Sub solidus Phase Relation and Crystal Structures of the Mixed - Phases in the In₂O₃-WO₃ System." *J. Solid State Chem*. 177 : 2740-2748.

- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**. 3rd ed. New York
Mc.Graw-Hill.
- Satyendra Kumar, Paramjit Singh, R.G. Sonkawade, Kamendra Awasthi, Rajesh Kumar.
2013. “60 MeV Ni ion induced modifications in nano-CdS/polystyrene
composite films.” *Radiation Physics and Chemistry*. 94(2014)49–53
- Sze, S.M. 1981. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd ed. New York : John Wiley &
Sons.
- van de Pauw, L.J. 1958. “A method of measuring specific resistivity and hall effect of
arbitrary shape.” *Philips Res. Reports*. 13 : 1-9.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.75-581

Pattern : 75-581		Radiation = 1 540600		Quality : Calculated	
Cd S		2th		l h k l	
Cadmium Sulfide		26 552		100 1 1 1	
		30 753		22 2 0 0	
		44 048		47 2 2 0	
		52 173		34 3 1 1	
		54 681		5 2 2 2	
		64 055		6 4 0 0	
		70 607		11 3 3 1	
		72 729		5 4 2 0	
		81 010		10 4 2 2	
		87 089		7 5 1 1	
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 144.47			
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 196.12			
a = 5.81000		Dx = 4.893			
Z = 4		I/Cor = 14.06			
<p>ICSD COLLECTION CODE 029278 TEST FROM ICSD No R value given TEST FROM ICSD At least one TF missing</p>					
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12+*, (1997) primary reference *Angew. Chem., volume 46, page 538, (1933) Mueller, W.J., Loeffler, G.</p>					
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified			
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ZnTe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.15-746

Pattern : 15-746		Radiation = 1.540600		Quality : High		
Zn Te		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Zinc Telluride		25.259	100	1	1	1
		29.248	10	2	0	0
		41.806	80	2	2	0
		49.498	35	3	1	1
		51.847	4	2	2	2
		60.634	8	4	0	0
		66.747	14	3	3	1
		68.739	4	4	2	0
		76.401	10	4	2	2
		81.969	8	5	1	1
		91.117	4	4	4	0
		96.624	6	5	3	1
		98.462	2	6	0	0
		105.956	6	6	2	0
		111.718	4	5	3	3
		113.709	2	6	2	2
		121.983	2	4	4	4
		128.702	6	5	5	1
		141.669	8	6	4	2
		151.645	6	7	3	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 192.98				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 227.27				
a = 6.10260		Dx = 5.640				
Z = 4		I/cor = 9.30				
<p>COLOR: Reddish brown SAMPLE SOURCE OR LOCALITY: Sample was obtained from Semi-Elements, Inc., Saxtonburg, PA, USA ANALYSIS: Spectrographic analysis: 0.01-0.1% of Si, 0.001-0.01% each of Al, Ba, Fe, and Mg TEMP. OF DATA COLLECTION: Pattern taken at 25 C</p>						
CAS 1315-11-3						
*Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 58, (1964), primary reference						
Radiation : CuK α 1		Filter : Beta				
Lambda : 1.54050		d-sp : Not given				
SS/FOM : F20=121(0.0079.21)		Internal standard : W				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Te ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.79-736

Pattern : 79-736		Radiation = 1 540600		Quality : Calculated		
Te		2 θ	I	h	k	l
		23.028	14	1	0	0
		27.568	100	0	1	1
Tellurium		38.287	37	1	0	2
		40.453	22	1	1	0
		43.358	9	1	1	1
		45.945	7	0	0	3
		47.059	2	2	0	0
		49.655	14	2	0	1
		51.279	5	1	1	2
		52.000	2	1	0	3
		56.918	9	0	2	2
		62.852	9	1	1	3
		63.757	5	2	1	0
		65.900	6	1	2	1
		67.746	5	0	1	4
		67.877	3	0	2	3
		72.135	4	2	1	2
		73.572	1	3	0	0
		75.585	2	3	0	1
		77.330	1	1	1	4
		81.524	2	0	3	2
		81.673	3	2	0	4
		82.095	5	2	1	3
		85.752	2	1	0	5
		87.494	1	2	2	0
		89.434	1	2	2	1
Lattice : Hexagonal	Mol. weight = 127.60					
S.G. : P3121 (152)	Volume [CD] = 101.82					
a = 4.45600	Dx = 6.243					
c = 5.92100	Z = 3					
	l/cor = 14.00					
ICSD COLLECTION CODE 065692						
TEMPERATURE FACTOR ATF						
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference						
*Acta Crystallogr. Sec. C, volume 45, page 941 (1989) Adenis, C., Langer, V., Lindqvist, D.						
Radiation : CuK α 1	Filter : Not specified					
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.77-2306

Pattern : 77-2306		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
CdS		2th	l	h	k	j
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.535	45	0	0	2
		29.216	100	1	0	1
		36.662	25	1	0	2
		43.738	43	1	1	0
		47.894	41	1	0	3
		50.949	6	2	0	0
		51.890	31	1	1	2
		52.866	13	2	0	1
		54.644	2	0	0	4
		58.354	5	2	0	2
		60.912	2	1	0	4
		66.858	12	2	0	3
		69.359	8	2	1	0
		70.962	9	2	1	1
		72.472	4	1	1	4
		75.572	8	1	0	5
		75.689	5	2	1	2
		77.956	1	2	0	4
		80.366	4	3	0	0
		83.367	10	2	1	3
		86.434	4	3	0	2
		87.021	1	0	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P6 ₃ mc (186) a = 4.13600 c = 6.71300 Z = 2 Mol. weight = 144.47 Volume [CD] = 99.45 Dx = 4.824 I/cor = 7.93						
ICSD COLLECTION CODE : 060629 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakiolas, Stevenso REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Airt. J. Phys. 1982 35 415-424 TEST FROM ICSD : At least one TP missing						
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference *Acta Crystallogr., Sec. B Structural Science, volume 40, page 521 (1984) Stevenson, A.W., Milanko, M., Barnea, Z.						
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ionic Radius

$$\text{Cd}^{2+} = 0.78 \text{ \AA}$$

$$\text{Te}^{2-} = 2.21 \text{ \AA}$$

$$\text{Zn}^{2+} = 0.60 \text{ \AA}$$

$$\text{S}^{2-} = 1.84 \text{ \AA}$$

การคำนวณหาค่า Lattice Constant

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_c^2}$$

$$a_c^2 = d^2(h^2 + k^2 + l^2)$$

$$2d \sin \theta = \lambda$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d = \frac{1.5406}{2 \sin(0.4636)} = 0.3445 \text{ \AA}$$

$$a_c = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

$$a_c = 0.3445 \sqrt{3} = 0.5966 \text{ \AA}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่าง a_c และ a_H, c_H

$$a_H = \frac{a_c}{\sqrt{2}} = \frac{0.5966}{\sqrt{2}} = 0.4219 \text{ \AA}$$

$$c_H = \frac{2a_c}{\sqrt{3}} = \frac{2(0.5966)}{\sqrt{3}} = 0.6889 \text{ \AA}$$

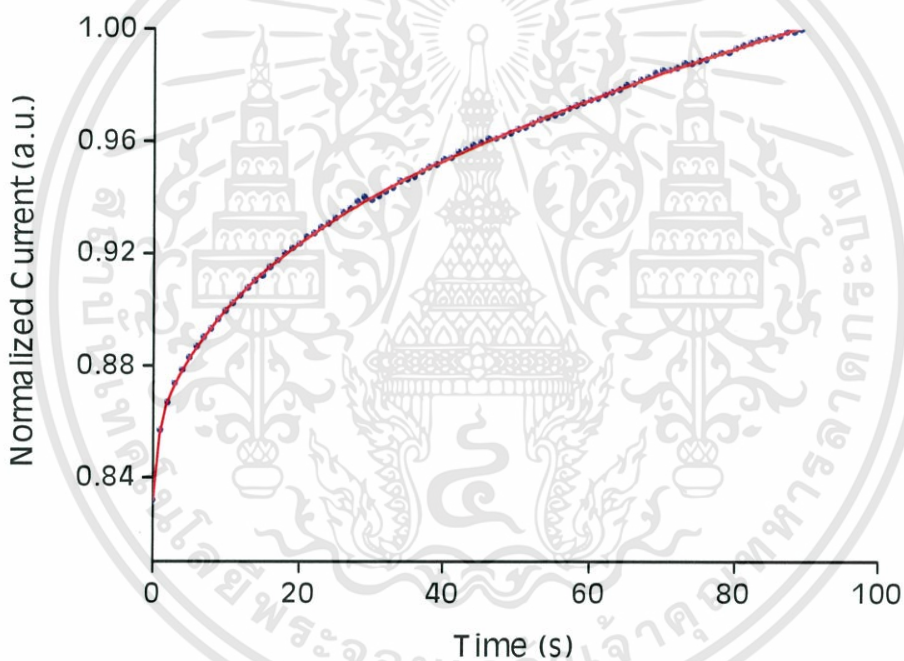
$$\text{GrainSize} = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos(2\theta)} = \frac{(0.94)(1.5406)}{(0.154) \cos(0.4636)} = 8.4110 \text{ nm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 0.0 Rise Time

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/63.50948)))+(b*(1-\exp(-x/260.2115)))+(c*(1-\exp(-x/471.3688)))+(d*(1-\exp(-x/836.4379)))+(e*(1-\exp(-x/1147.828)^f))+0.0173$$

a	0.02945	$\tau_1 (s)$	63.5095
b	-2.999	$\tau_2 (s)$	260.2115
c	12.4	$\tau_3 (s)$	471.3688
d	-12.78	$\tau_4 (s)$	836.4379
e	0.03751	$\tau_5 (s)$	1147.8278
f	0.6788		

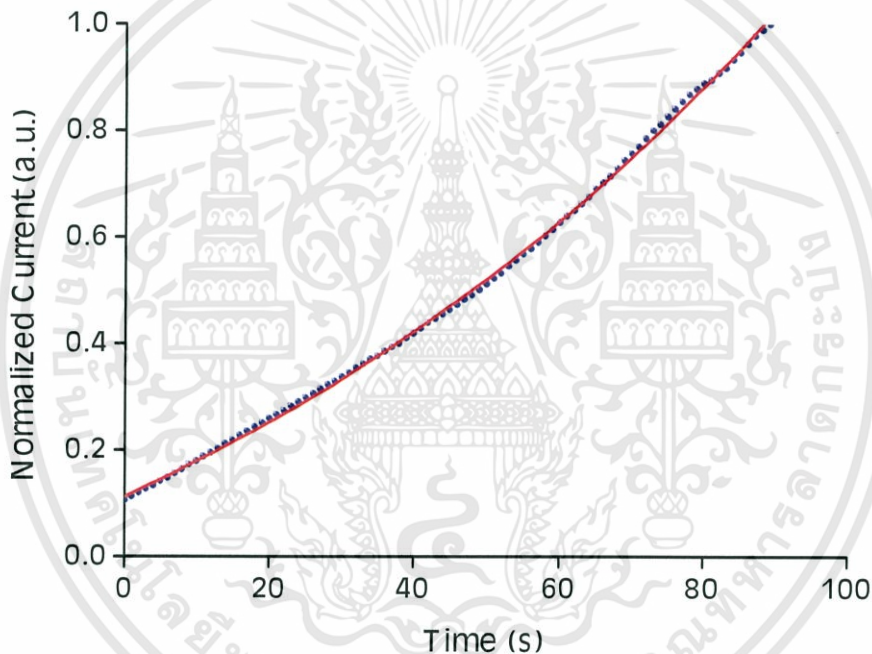


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.2 Rise Time

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/19.2269)))+(b*(1-\exp(-x/33.92989)))+(c*(1-\exp(-x/49.80465)))+(e*(1-\exp(-x/67.00337)^f))+0.000001$$

a	0.02144	τ_1 (s)	19.2269
b	-0.08687	τ_2 (s)	33.9299
c	0.08021	τ_3 (s)	49.8047
e	0.001203	τ_4 (s)	67.0034
f	0.6463		

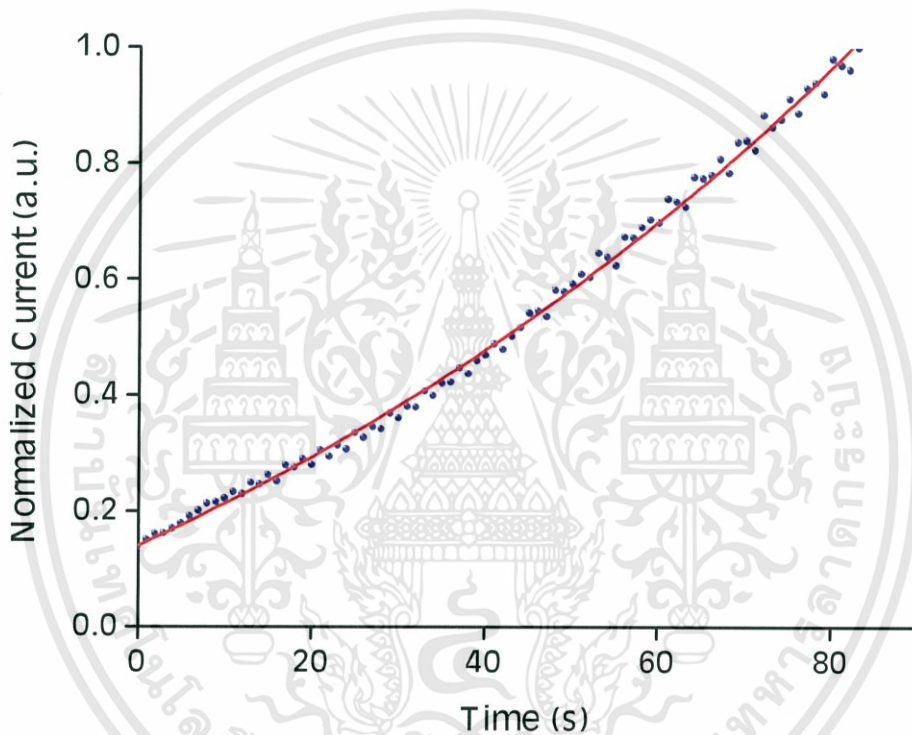


การพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.4 Rise Time

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/8.31207)))+(b*(1-\exp(-x/18.34994)))+(c*(1-\exp(-x/80.67498))^f)$$

a	8.726e-008	τ_1 (s)	8.3121
b	-9.896e-009	τ_2 (s)	18.3499
c	1.397e-009	τ_3 (s)	80.6750
f	0.8924		



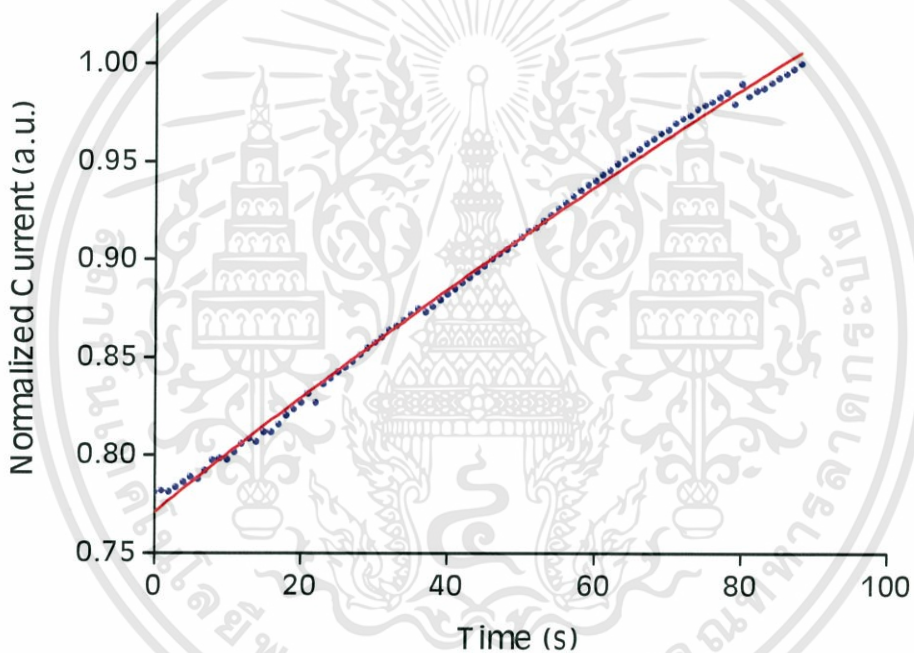
การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 0.6 Rise Time

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/289.9661)))+(b*(1-\exp(-x/318.5214)))+(c*(1-\exp(-x/360.6699)))+(e*(1-\exp(-x/559.1251)^f))+0.000009325$$

a	-0.02521	τ_1 (s)	360.6699
b	0.05035	τ_2 (s)	289.9661
c	-0.02564	τ_3 (s)	318.5214
e	1.485e-006	τ_4 (s)	559.1251
f	0.7793		

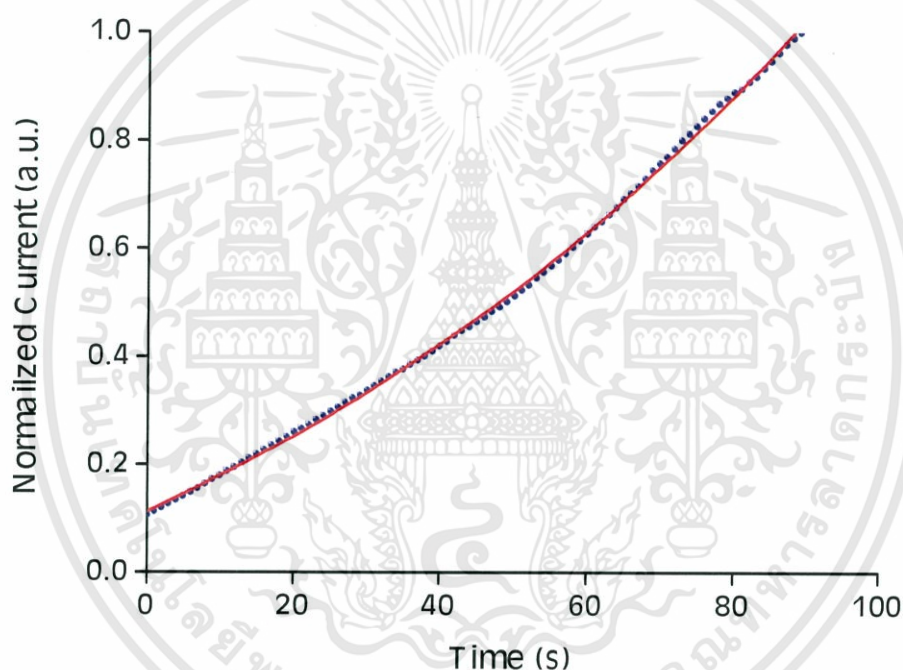


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจอร์นัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.8 Rise Time

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/18.58332)))+(b*(1-\exp(-x/28.34689)))+(c*(1-\exp(-x/47.30319)))+(e*(1-\exp(-x/61.51554)^f))+0.00099$$

a	0.04563	τ_1 (s)	18.5833
b	-0.1058	τ_2 (s)	28.3469
c	0.08959	τ_3 (s)	47.3032
e	-0.01727	τ_4 (s)	61.5155
f	0.7392		

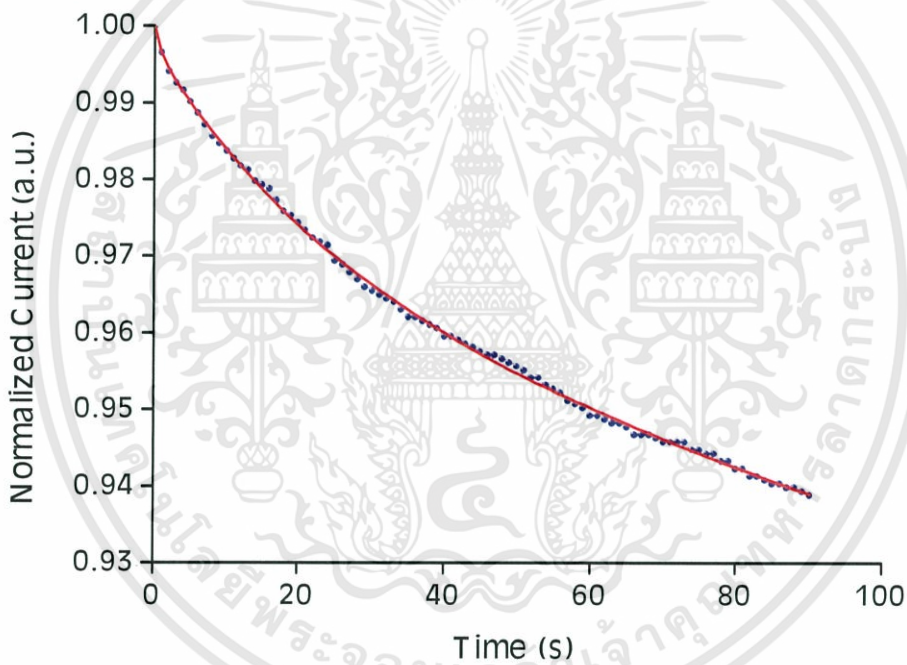


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลโลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.0 Decay Time

$$f(x) = (a*(\exp(-x/480.4793)))+(b*(\exp(-x/843.4966)))+(c*(\exp(-x/1056.309)))+ (d*(\exp(-x/1600.326))) + (e*(\exp(-x/2300)^z))$$

a	3.739	τ_1 (s)	480.4793
b	-42.08	τ_2 (s)	843.4966
c	55.97	τ_3 (s)	1056.3095
d	-16.79	τ_4 (s)	1879.3263
e	-0.8145	τ_5 (s)	2596.8563
z	0.9957		

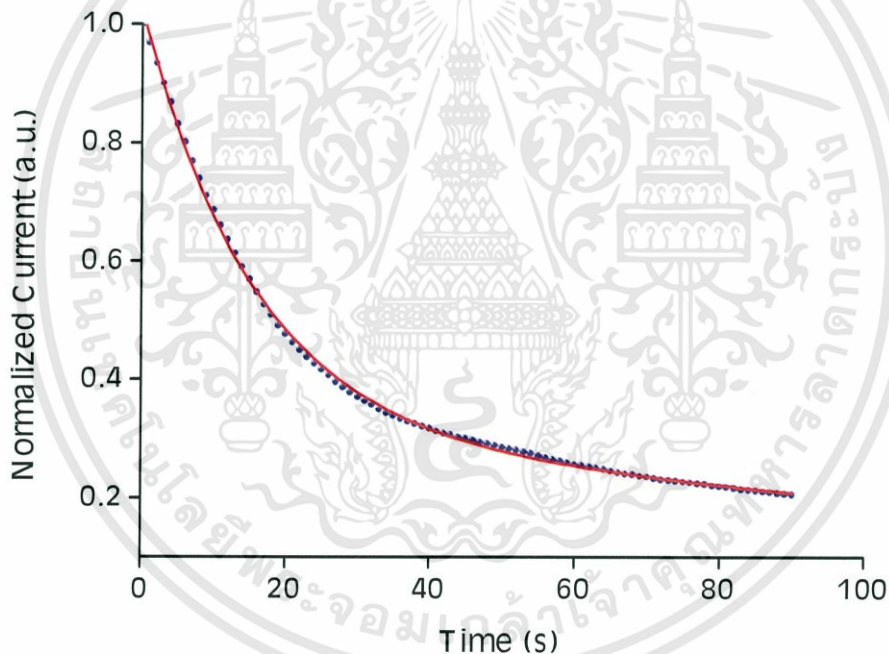


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ชาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.2 Decay Time

$$f(x) = (a*(\exp(-x/26.36875)))+(b*(\exp(-x/37.48887)))+(c*(\exp(-x/52.4921)))+(d*(\exp(-x/86.63713)))+(e*(\exp(-x/101.0122)))+(g*\exp(-x/152.323)^f)$$

a	0.1053	$\tau_1 (s)$	26.3688
b	-0.348	$\tau_2 (s)$	37.4889
c	0.4645	$\tau_3 (s)$	52.4921
d	-0.6011	$\tau_4 (s)$	86.6371
e	0.3913	$\tau_5 (s)$	101.0122
g	0.3752	$\tau_6 (s)$	152.3230
f	-0.00402		

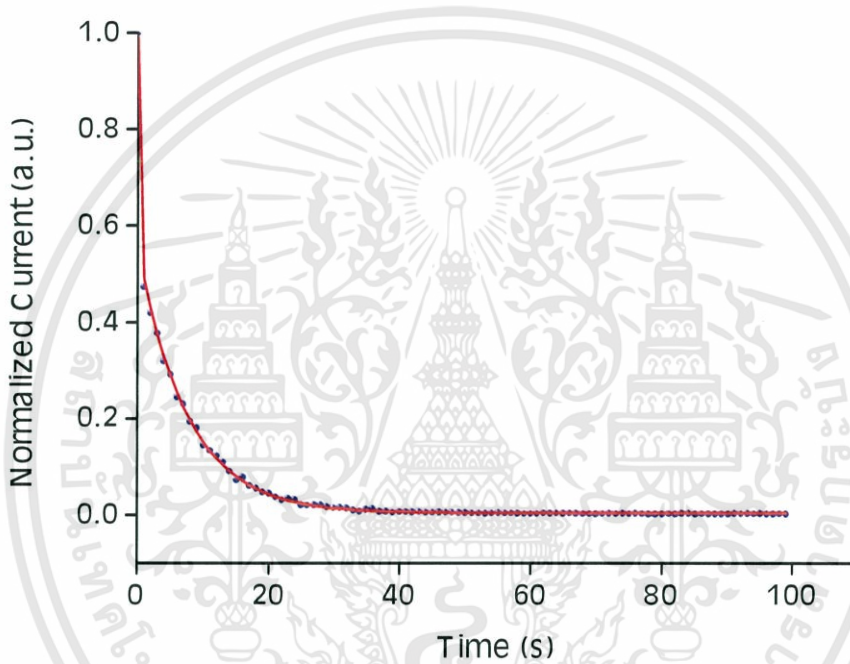


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.4 Decay Time

$$f(x) = (a*(\exp(-x/8.31207)))+(b*(\exp(-x/18.34994)))+(c*\exp(-x/80.67498)^f)$$

a	8.726e-008	τ_1 (s)	8.3121
b	-9.896e-009	τ_2 (s)	18.3499
c	1.397e-009	τ_3 (s)	80.6750
f	0.8924		

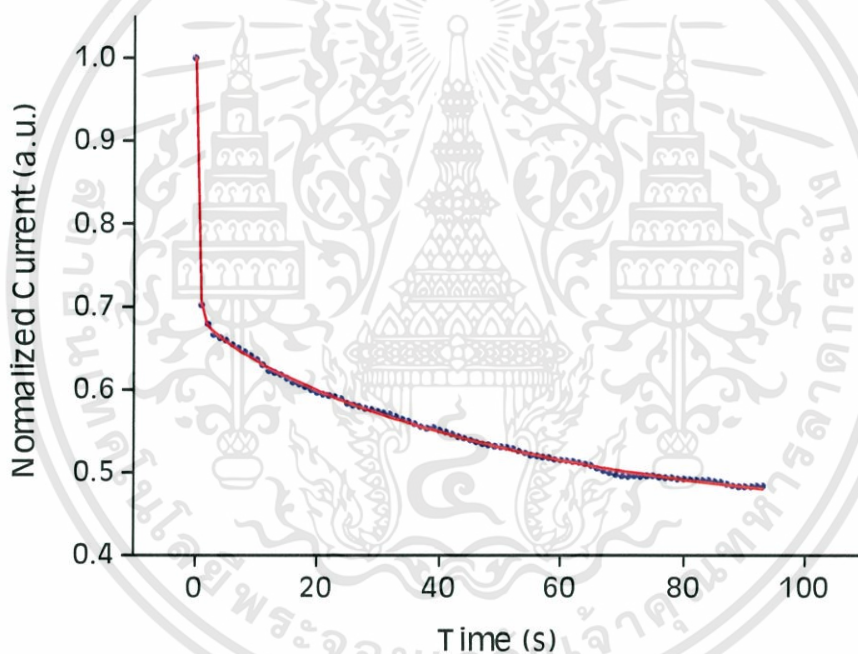


การพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอมป์มิลลิโวลต์กับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.6 Decay Time

$$f(x) = (a*(\exp(-x/36.14989)))+(b*(\exp(-x/147.6965)))+(c*(\exp(-x/244.9644)))+(d*(\exp(-x/315.4772)))+(e*\exp(-x/686.9281)^f)$$

a	-2.056e-006	τ_1 (s)	36.1499
b	7.342e-005	τ_2 (s)	147.6965
c	-0.0002339	τ_3 (s)	244.9644
d	0.0001662	τ_4 (s)	315.4772
e	4.768e-006	τ_5 (s)	686.9281
f	0.4135		

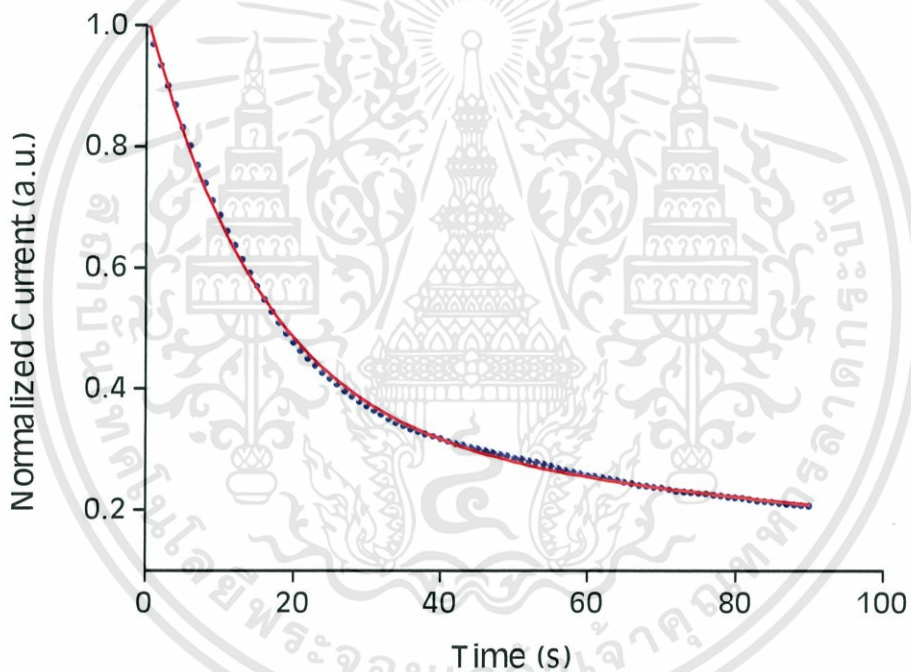


การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจอร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

X = 0.8 Decay Time

$$f(x) = (a*(\exp(-x/32.36875)))+(b*(\exp(-x/41.15859)))+(c*(\exp(-x/65.43233)))+ (d*(\exp(-x/80.843)))+(e*(\exp(-(x/95)^z)))$$

a	0.4287	$\tau_1 (s)$	26.3688
b	-1.087	$\tau_2 (s)$	39.1586
c	3.109	$\tau_3 (s)$	64.4323
d	-4.358	$\tau_4 (s)$	98.8430
e	1.915	$\tau_5 (s)$	147.7635
z	1.005		



การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษา ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} \rho &= R_{sh} d \\ &= (1.08 \times 10^3) (1 \times 10^{-4}) = 1.08 \times 10^{-1} \text{ โอห์ม-เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} R_H &= (10^8) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= (10^8) \left(\frac{0.0029}{10^{-4}} \right) \left(\frac{10^{-4}}{4600} \right) \\ &= 63 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์} \end{aligned}$$

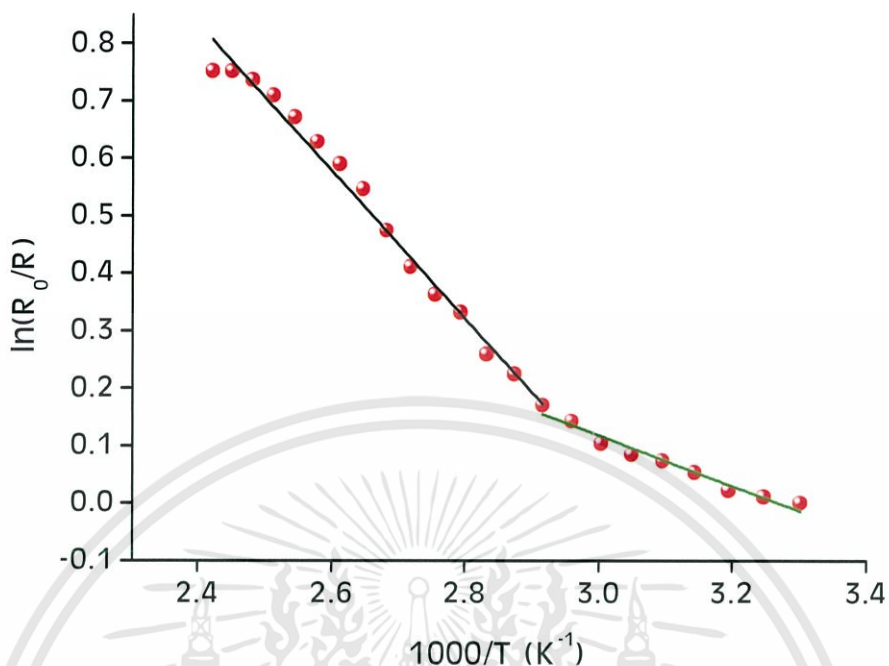
จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{q R_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(63)} \\ &= 9.91 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \mu_H &= \frac{R_H}{\rho} = \frac{(63)}{(1.08 \times 10^{-1})} \\ &= 5.81 \times 10^2 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)} \end{aligned}$$

X = 0.0



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

$$E_a = \frac{1,000K(\text{Slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (1.283)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

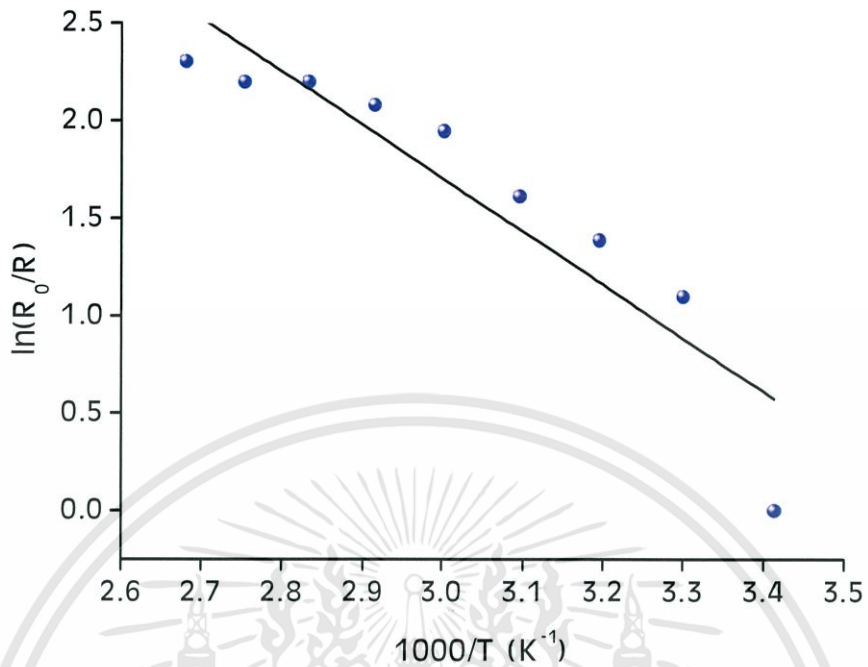
$$E_1 = 0.111 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (0.438)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.038 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 0.2



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

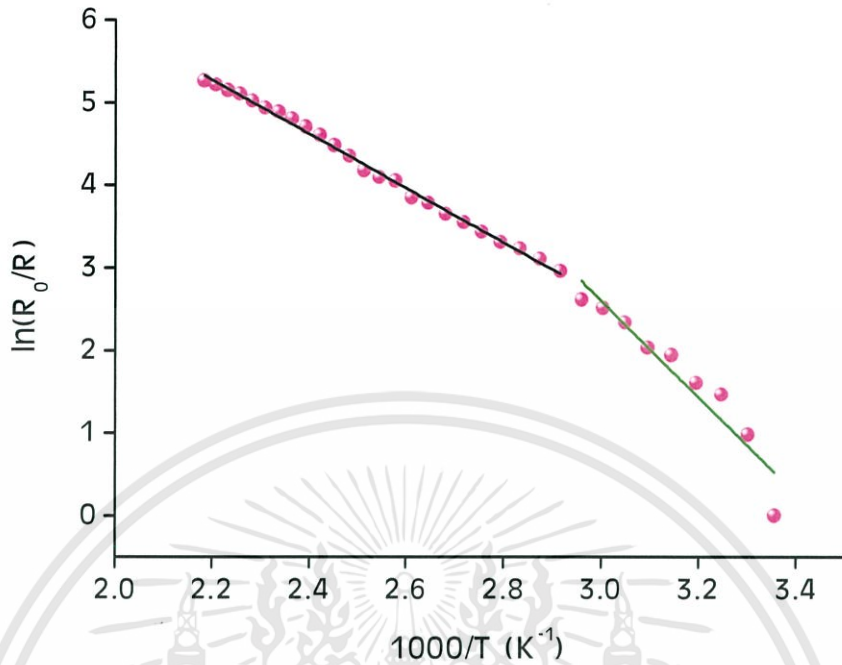
$$E_a = \frac{1,000K(\text{Slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (2.7369)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = 0.236 \text{ อีเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 0.6



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x เมื่อ x = 0.6 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

$$E_a = \frac{1,000K(Slope)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (3.2882)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

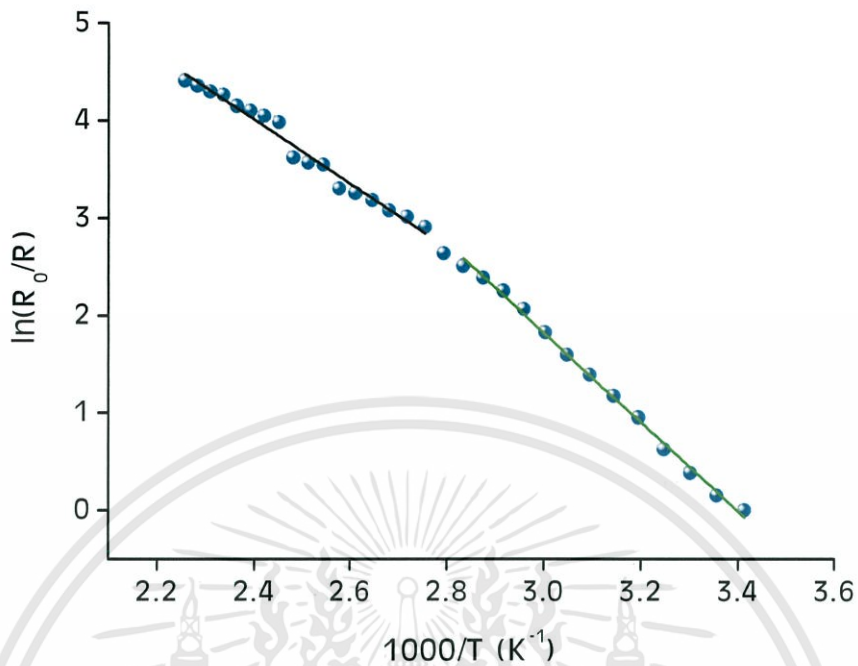
$$E_1 = 0.283 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (5.8405)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.503 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 0.8



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

$$E_a = \frac{1,000K(\text{Slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (3.284)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

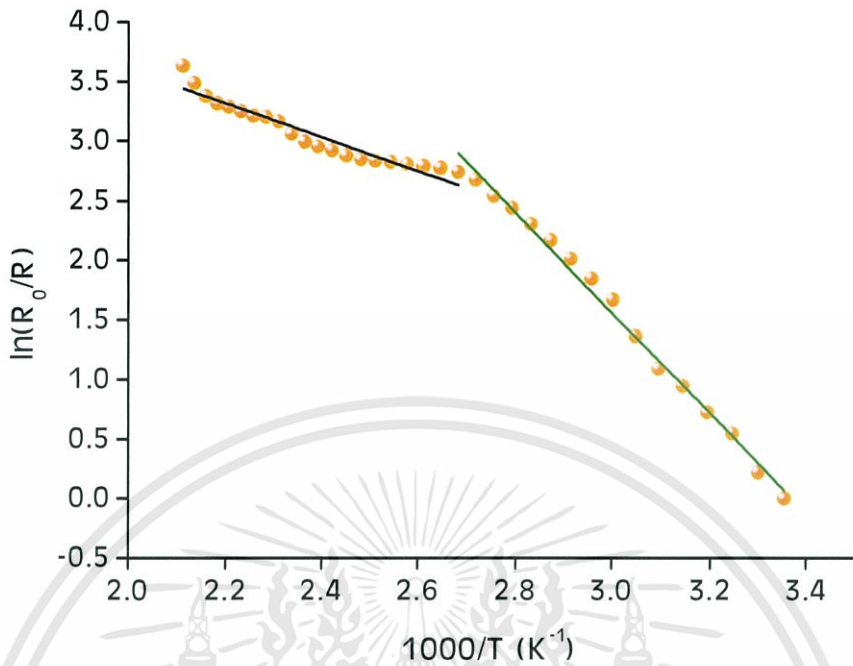
$$E_1 = 0.283 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

$$E_2 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (4.579)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.394 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X = 1.0



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x เมื่อ x = 1.0 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

$$E_a = \frac{1,000K(Slope)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (1.428)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_1 = 0.123 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

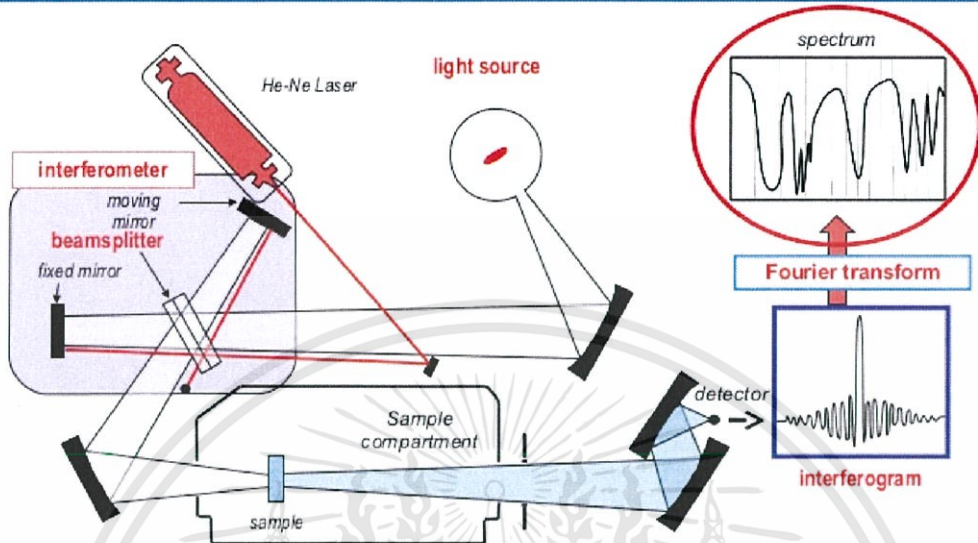
$$E_2 = \frac{1,000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (4.2)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_2 = 0.362 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

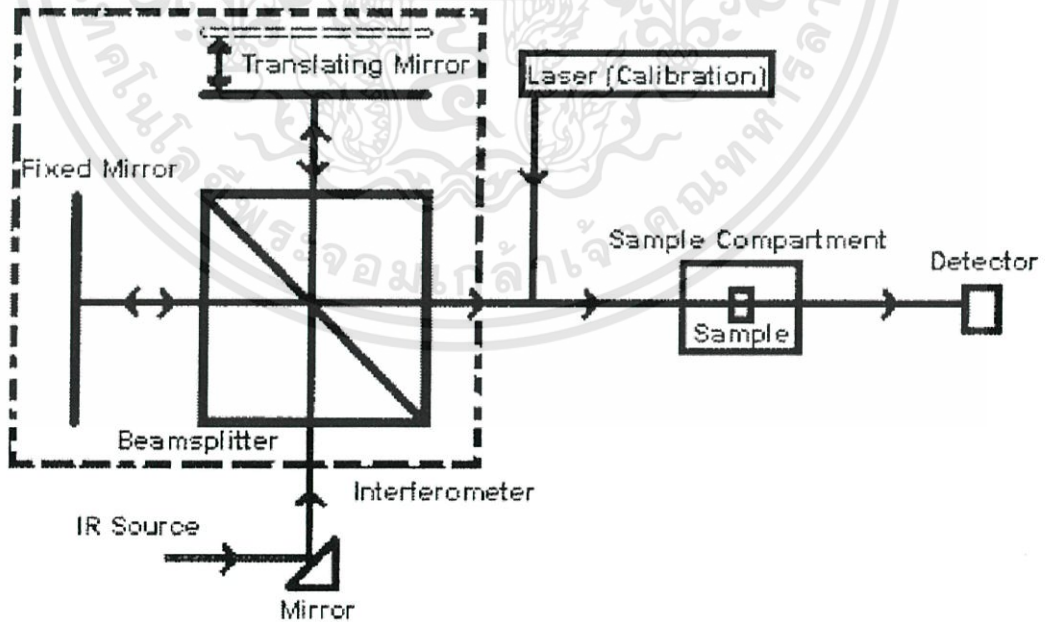
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกภาพ

Fourier Transform Infra-Red Spectrophotometer (FTIR)

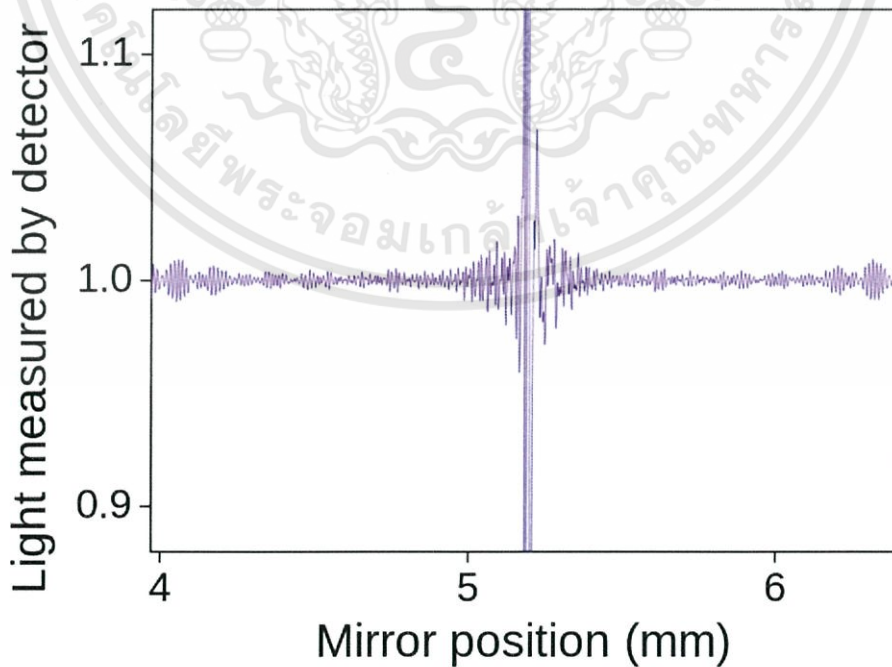
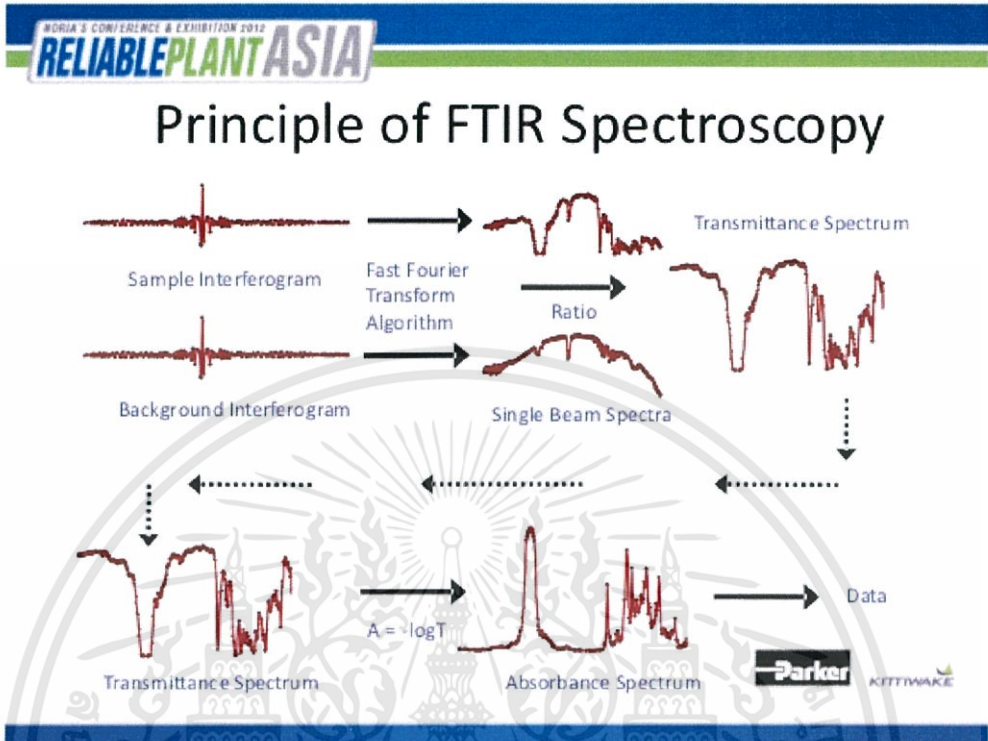


Radiation emitted from the source is split into two with a **beamsplitter** in the **interferometer**. The fixed and moving mirrors reflect each of the beam back to the beamsplitter, where the two beams recombine into one and falls on the detector. The two beams combine constructively or destructively, varying as the optical path difference, when the moving mirror is moved. When the combined beam is transmitted through the sample, it is detected as an **interferogram** and contains all infrared information on the sample. The infrared spectrum is obtained from the interferogram by the mathematical process of **Fourier transformation**.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวกภาพ(ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายดุสิต ถิ่นมั่น
วัน เดือน ปีเกิด 8 มิถุนายน 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน 66 ม.7 ตำบล บ้านพริก อำเภอ บ้านนา จังหวัด นครนายก 26110
การศึกษา ปี พ.ศ. 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์
ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นายทิมมพร จันท์เพ็ญ
วัน เดือน ปีเกิด 25 เมษายน 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน 107/62 ซ.บึงขวาง1/1 แขวงแสนแสบ ถนนสุขุมวิท เขตมีนบุรี จังหวัด
กรุงเทพมหานคร 10510
การศึกษา ปี พ.ศ. 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์
ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้