

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$
($0 \leq X \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน
ในระบบสุญญากาศ

CHARACTERIZATION OF $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq X \leq 1$) THIN
FILMS PREPARED BY VACUUM THERMAL
EVAPORATION METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ใน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบปีการศึกษา 2559 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq X \leq 1$) THIN
FILMS PREPARED BY VACUUM THERMAL
EVAPORATION METHOD



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ
ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq X \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
Characterization of $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq X \leq 1$) Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method

ชื่อนักศึกษา นายสุเมธี หงษา รหัสนักศึกษา 56051232
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เป็นการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกฉบับที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
ชื่อนักศึกษา	นายสุเมธิ หงษา รหัสนักศึกษา 56051232
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่มีองค์ประกอบเป็น ($x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบของ $CdSe$ และ $ZnSe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ Zn ที่ปรากฏในเนื้อฟิล์มบางที่มีต่อ โครงสร้างผลึก รูปพรรณสัณฐาน สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่มีเศษส่วนโมล (x) ต่ำกว่า 0.4 จะเป็นแบบเฮกซะโกนอลที่มีพิคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (002) โดดเด่นที่สุด ส่วนกรณีเศษส่วนโดยโมล (x) ตั้งแต่ 0.8 จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก และมีพิคการเลี้ยวเบนของระนาบผลึก (111) ปรากฏโดดเด่นที่สุด สำหรับกรณีเศษส่วนโดยโมล (x) เท่ากับ 0.6 จะปรากฏเฟสคิวบิกและเฮกซะโกนอลเกิดร่วมกัน และความโดดเด่นของพิค (002) และ (111) ลดลง ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสามารถตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เชิงเส้นจาก 2.33 เป็น 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามปริมาณเศษส่วนโดยโมล (x) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามแบบสมการกำลังสอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความโค้งเท่ากับ 0.366 จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มบางได้ โดยที่ค่าดัชนีหักเหของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องดีกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงได้ จากค่าดัชนีหักเหของแสงที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแลตทิซ (ϵ_L) และอัตราส่วนของความหนาแน่นของพาหะอิสระต่อมวลยังผล (N/m^*) ได้ อีกทั้งยังได้วิเคราะห์จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางอิเล็กทรอนิกส์ และสภาพนำเชิงแสงอีกด้วย ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์โดยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางสามารถคำนวณได้จากความต้านทานที่เปลี่ยนไปในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ อาจมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารฉบับนี้ถูกเผยแพร่โดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) โดยสงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่ากรณีใดๆ พึงเห็นว่าเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ว่ากรณีใดๆ พึงเห็นว่าเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Title	Characterization of Cd _{1-x} Zn _x Se (0 ≤ X ≤ 1) Thin Films Prepared by Vacuum Thermal Evaporation Method
Students	Mr. Sumetee Hongsra Student ID 56051232
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof. Thitinai Gaewdang

Abstract

In this special project, Cd_{1-x}Zn_xSe thin films with different compositions (x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0) were deposited by vacuum thermal evaporation method using high purity grade CdSe and ZnSe power on substrate. The Zn composition (x) effect on the structural, morphological, optical and electrical properties of Cd_{1-x}Zn_xSe thin films were investigated. The XRD patterns shown that thin films were crystallized in pure hexagonal phase with (002) preferred orientation at x ≤ 0.4. While, x ≥ 0.8, these films were crystallized in pure cubic phase with (111) preferred orientation. For the composition x=0.6 the cubic and hexagonal phases were found to coexist in the system and the films become less preferentially oriented. AFM was used to study morphological features of the films. The energy gap values were change nonlinearly from 2.33 to 2.80 eV depending on the Zn composition following quadratic equation with bowing parameter as 0.366. The optical constants of the films were determined using the interference maxima and minima of the transmission spectra. The dispersion of refractive index was discussed in terms of the single oscillator model and the important oscillating parameters were determined. The analysis of the refractive index was carried out to calculate the lattice dielectric constant (ϵ_L) and the ratio of carrier concentration to the effective mass (N/m^{*}). The real and imaginary parts of the electronic dielectric constants and optical conductivity were analyzed. Electric 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: Cd_{1-x}Zn_xSe thin films, Thermal evaporation method, XRD, Single oscillator model, Optical parameters

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในสูญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนให้ ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณกัญญ์กนิษฐ์ จันทร์ครบ และ คุณจรรุวรรณ มีนาง นักศึกษาปริญญาโทใน ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือใน การทำโครงการพิเศษแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อ วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบันสุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนใน การศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



สุเมธ หงษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัตถุประสงค์ของเชิงสารกึ่งตัวนำ	4
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม 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 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
2.6 การส่งผ่านแสง	12
2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	13
2.6.2 ส่วนทางของแถบพลังงาน	14
2.7 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว	15
2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	23
2.8.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.8.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	25
2.8.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.8.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาร์	32
2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	34
2.9.1 อัตรการระเหยสาร	34
2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	35
2.9.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน	35
2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป	35
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.10.1 การเตรียมข้อต่อที่ไคโอดของฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธุ์ CdZnTe สำหรับการตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ต	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย มีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้	38
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	38
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	38
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	39
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	39
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	39
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	39
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ องค์ประกอบต่างๆ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1 ตามลำดับ) เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	39
3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq X \leq 1.0$)	39
3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	42
3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้าภากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ	42
3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	43
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$	44
3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง	44
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค	44
3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค	44
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	44
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ความต้านทานแผ่น (R_s) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (ρ_B) ด้วยวิธีสองขั้ว	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 46
- 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 47
- 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 47
- 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ 51
- 4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 52
- 4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 52
- 4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรด ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 56
- 4.3.3 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 59
- 4.3.4 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งความร้อนในระบบสุญญากาศศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.5 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดโพลีทริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	69
4.2.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	69
4.2.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
5.1.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
5.1.3 ผลของการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81
5.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq X \leq 1.0$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	42
4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	50
4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	52
4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%	55
4.4 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของย่านกลาง (Middle infrared) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	57
4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของทราंसมิสชันอินฟราเรดของย่านกลาง (Middle infrared) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	58
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65
4.7 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ	4
2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	5
2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ	6
2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ของสารกึ่งตัวนำ	6
2.5 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก	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 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	15
2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF	19
2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ $Ba_2NaNb_5O_{15}$	19
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS	20
2.16 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.17 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ ...	24
2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	25
2.19 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	27
2.21 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	28
2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	32
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	33
2.24 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน	35
2.25 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	36
2.26 แสดงลักษณะพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธ์ CdZnTe	37
2.27 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไบอัส	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของซอฟต์แวร์ที่ได้ออู Au/CdZnTe 37

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	43
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	45
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	46
4.2 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	47
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_H , c_H และ a_C กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	49
4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	51
4.5 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(ah\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	53
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) เพื่อหาค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	54
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด(FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 800 – 1000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
4.10 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด(FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400 – 800 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
4.11 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	59
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	60
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	61
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^{-2}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	62
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	67
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	68
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์(V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นลดลง จึงทำให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันที่มีราคาเพิ่มขึ้นสูงมากทั่วโลก ในหลายประเทศได้มีการหามาตรการต่างๆเพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ๆเพื่อมาทดแทนที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำและใช้ได้ในระยะยาวนาน

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบคเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 จากการศึกษาสมบัติของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II – VI เช่น สารกึ่งตัวนำ CdSe ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพียงติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี

สารกึ่งตัวนำ CdSe ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางมาเป็นเวลานาน เนื่องจาก CdSe เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเคมีไฟฟ้า-แสง (photo-electrochemical solar cells) ตัวตรวจจับแสง (photo-detector) ตัวตรวจจับแก๊ส (gas detectors) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (thin film transistors) ตัวตรวจจับรังสีแกมมา (gamma ray detector) และแอลอีดี (Gnatenko et al.,2014; Velumani et al.,2004) เป็นต้น อีกทั้งฟิล์มบาง CdSe ยังสามารถประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเด็ม (Mahawela et al.,2003; Mahawela et al.,2005) เนื่องจาก CdSe มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

สารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความโดดเด่นต่อการประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น (n-type) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง สามารถที่จะปรับแต่งค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ตั้งแต่ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีของ CdSe) จนถึง 2.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีของ ZnSe) ขึ้นกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) (Mezrag et al.,2010; Ameri et al.,2012; Huang et al.,2012) ซึ่งสเปกตรัมของพลังงานครอบคลุมเกือบตลอดช่วงของแสงย่านตามองเห็นได้ สารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ นี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง สภาพคล่องของพาหะอิสระมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่วารณาใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าซิลิคอนซึ่งเหมาะสำหรับนำมาเอาไปประดิษฐ์เป็นเซลล์ตัวบน (top cell) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเด็มได้เป็นอย่างดี

ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็งตลอดช่วงของสัดส่วนโมล ($0 \leq x \leq 1$) (Sutragar et al., 2010) เมื่อ $x \leq 0.2$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ แต่เมื่อ $x \geq 0.7$ จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ สำหรับ x ที่อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.7 จะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และแบบเวิร์ทไซต์ผสมกันอยู่ (Sutrave et al., 1999) และเกรนมีขนาดเล็กมากอยู่ในระดับไม่กี่สิบนานโนเมตร แต่ขนาดของเกรนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) กล่าวคือตั้งแต่ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีของ CdSe) จนถึง 2.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีของ ZnSe) และอุณหภูมิแอนนิลจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ (Deo et al., 2014) สารกึ่งตัวนำ CdSe สามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเด็มได้ (Mahawela et al., 2003; Mahawela et al., 2005) และฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ได้รับการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้เป็นขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเคมีไฟฟ้า-แสง (PEC solar cells) (Ramrakhiani., 1995; Chavhan et al., 2009; Chate et al., 2010) การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร (Camacho et al., 2002) หรือในระดับนาโนเมตร (Wen et al., 2010) สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีเคลือบด้วยลำโมเลกุล (MBE) (Camacho et al., 2002; Wen et al., 2010; Perna et al., 2014) วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) (Ammar., 2001; Ammar., 2001) วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Suthagar et al., 2010; Rao et al., 1993) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี (Chate et al., 2010; Chavhan et al., 2009) วิธีอาบสารละลายเคมี (Sutrave et al., 2014; Deo et al., 2014) และวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด (Gnatenko et al., 2014; Spalatu et al., 2011) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จากนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค และเชิงมหภาคโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทำการศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdSe และ ZnSe ความบริสุทธิ์สูง 99.999%
- 2) ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอิเล็กตรอน (AFM)
- 3) ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 4) ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ ZnSe ตามองค์ประกอบ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 2) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 3) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง
- 4) ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลวิจัยผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์
- 2) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ ZnSe ตามองค์ประกอบ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 3) ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 4) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง
- 5) ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 7) จัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
- 3) ทำให้ทราบถึงผลขององค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ที่มีต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 4) ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาทฤษฎีและกฎเกณฑ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

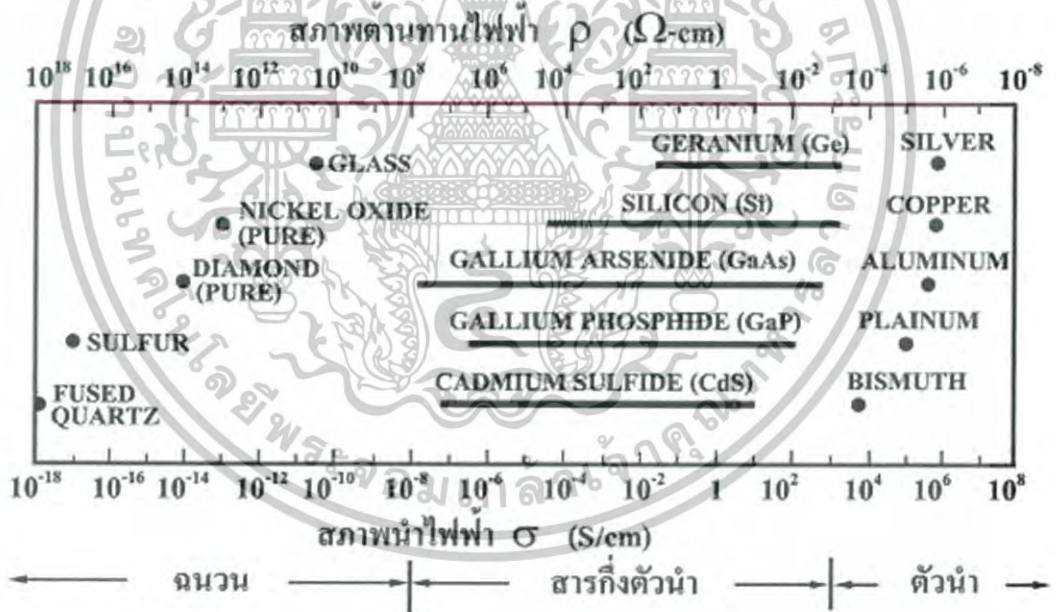
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

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

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำ เช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^8 ซีเมนตต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิการฉายแสงสนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

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

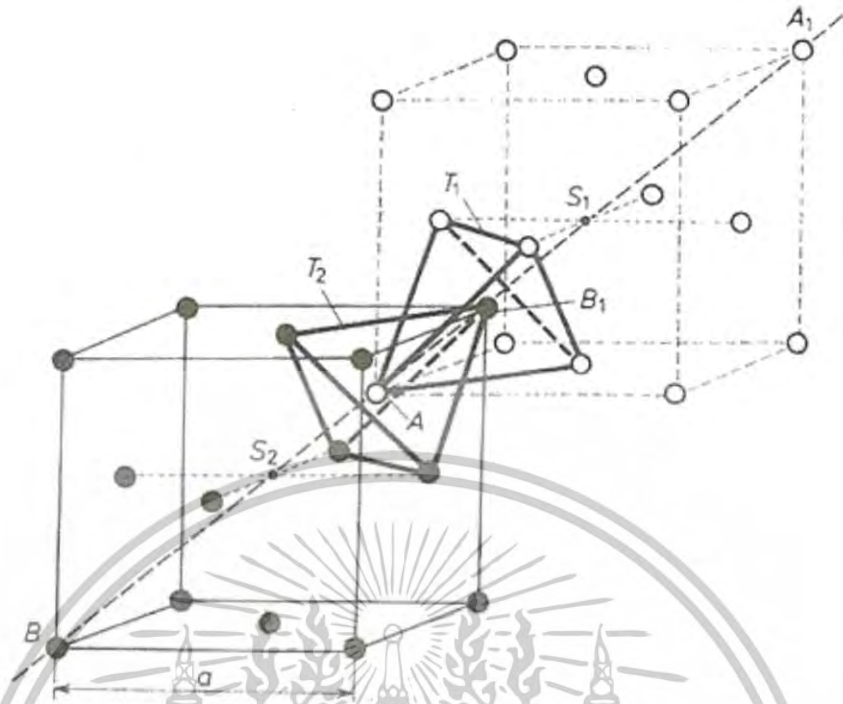
VI (อะตอม C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างแต่ละอะตอม A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล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



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

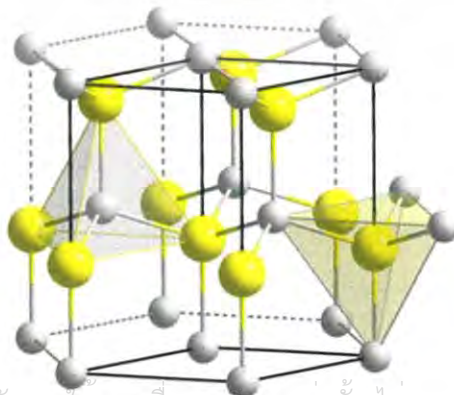
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามใช้ข้อมูลไปเผยแพร่และต่อยอดจึงถึงอำนาจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ของสารกึ่งตัวนำ

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

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

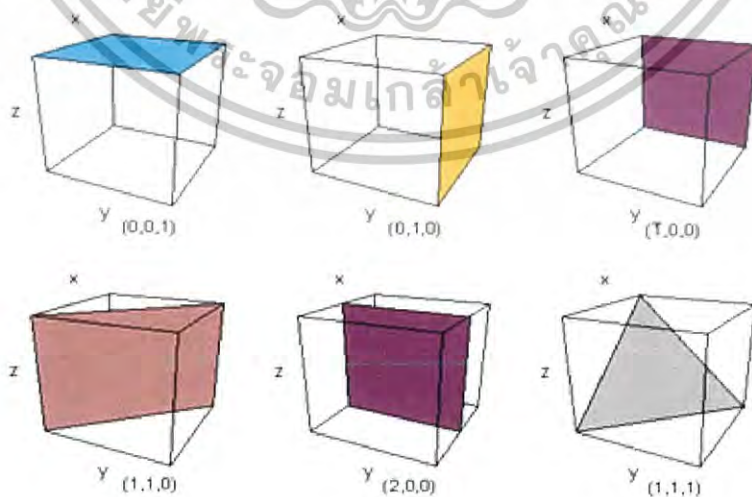
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยสังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x = 1, y = 2, z = 3$

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) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บและไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนี मिलเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนี मिलเลอร์ เช่น ระนาบ (010) นั้นจะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0, 1/1, 1/0)$ หรือที่จุด $(\infty, 1, \infty)$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.5 การบอกรหัสระนาบต่างๆ ของผลึก แต่หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

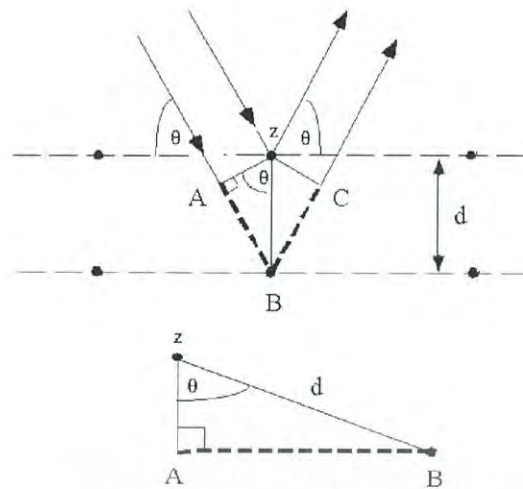
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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)

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

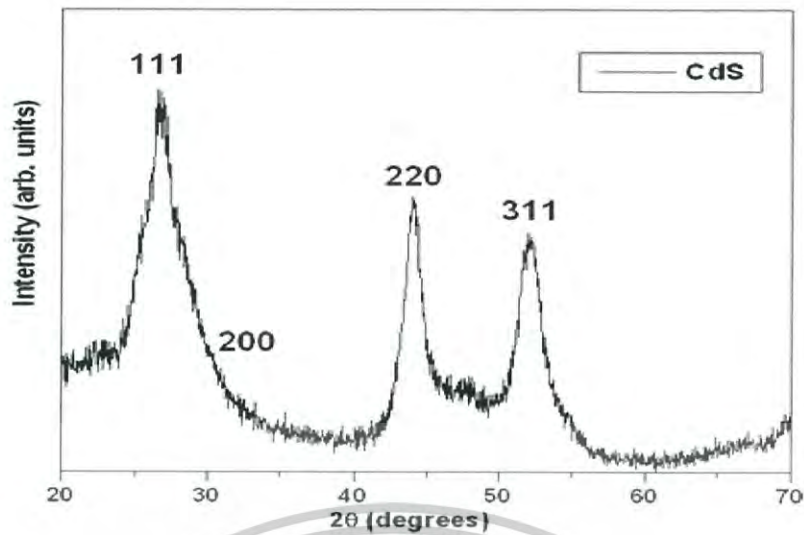
และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

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

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



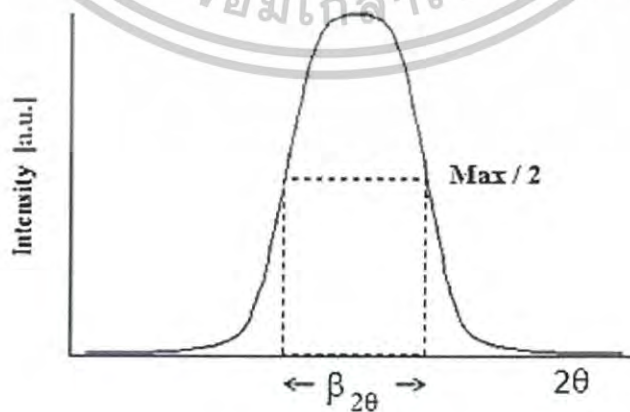
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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)



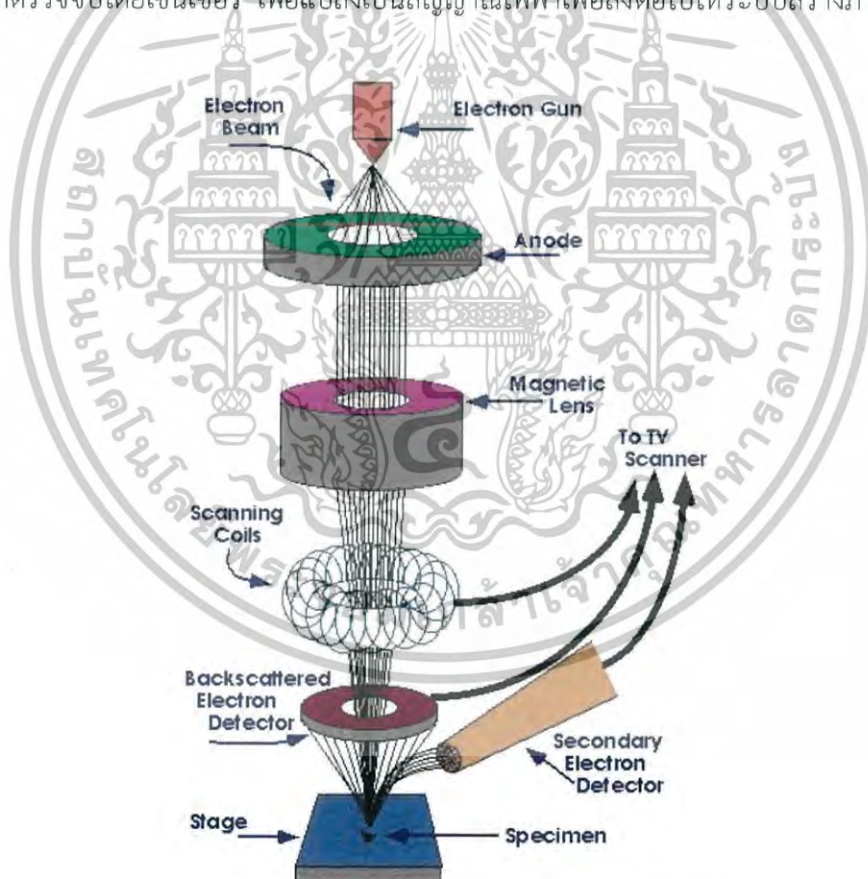
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.8 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ท่านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จ ในปี พ.ศ.2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียมแอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

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



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การส่งผ่านแสง (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุขฤกษ์ภูมิ, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ตูสิต, 2535)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่ง $I_x = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T' = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T' = e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

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

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(ahv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.12)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

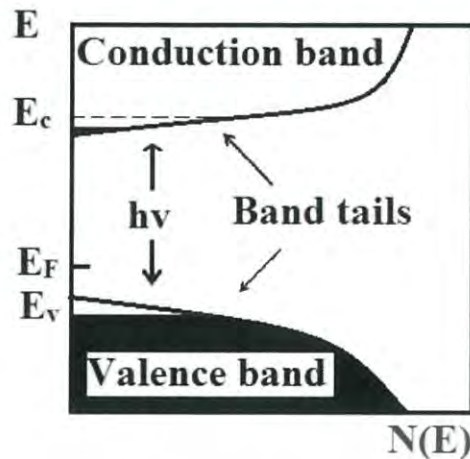
$$(ahv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลตั้งความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าของที่ของโบลต์ซมันน์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.7 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เชิงเดี่ยว (single oscillator model) (ฐิตินัย, 2546;

ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2514; Kittel, 2548; งามนิตย์, 2531; Swanepoel, 2526;

Wemple, 2514; Wemple, 2516; Jackson, 2542; David J, 2542; Jiang, 2555)

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

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{-2\omega}{\pi} P \int_0^\infty \frac{\varepsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

โดยที่ P คือค่าส่วนหลัก (principal part) สำหรับในวัสดุที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะอยู่ในย่านโปร่งแสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน และค่าจำนวนจริงนี้จะสัมพันธ์กับค่าจำนวนจินตภาพซึ่งค่าจำนวนจินตภาพนี้จะอยู่ในย่านดูดกลืนแสงและมีพลังงานสูงกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างแถบพลังงานตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_c \quad (2.16)$$

เมื่อ ω_c คือ ความถี่ขีดเริ่ม และ $\varepsilon_1 = n^2$ สำหรับความถี่ ω นี้จะกำหนดให้มีความถี่สูงกว่าความถี่ของการสั่นของแลตทิซ (lattice) ทั้งหมด จากสมการที่ (2.16) ค่าดัชนีหักเหสามารถหาได้จากการอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ถึงแม้ว่ากระบวนการคำนวณหาค่า $\varepsilon_2(\omega)$ จะอยู่ในกรอบของทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็งที่มีอิเล็กตรอนตัวเดียว (one electron band theory of solids) กระบวนการคำนวณดังกล่าวจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดบริลลูนโซน (brillouin zone) รวมทั้งอินทิเกรตตลอดทุกย่านความถี่ ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์อาจจะมีแนวโน้มคลุมเคลือขึ้นกับรายละเอียดของการคำนวณ นอกจากนั้นยังมีการใส่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรับค่าได้เข้าไปในกระบวนการคำนวณ ถ้ายิ่งวัสดุนั้นเป็นวัสดุไอออนิกการย้ายสถานะพลังงานเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงก็ยิ่งยากที่จะหาค่าในเชิงปริมาณได้อย่างถูกต้อง ฟิลลิปส์และฟาน วิกเทน (Phillips and Van Vechten) ได้ใช้แบบจำลองของเพนน์ (Penn model) ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant) เพื่อบินยามค่าช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย (average energy gap; E_g) ในขณะที่ เวมเพิล-โดโดเมนนิโค ใช้ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งแสดงถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแสง เพื่อบินยามพารามิเตอร์ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (dispersion energy; E_d) พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์มากเนื่องจากสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายได้และใช้ได้กับสารประกอบจำนวนมาก ถึงแม้ว่าสมการความสัมพันธ์เหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในรายละเอียด แต่สิ่งที่เหมือนกันคือจะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกและความเป็นไอออนิกของผลึกซึ่งส่งผลต่อลักษณะสมบัติของค่าดัชนีหักเหของวัสดุของแข็งต่างๆ

จากการใช้ทฤษฎีเพอร์เทอร์เบชันที่ขึ้นกับเวลา (time dependent perturbation theory) จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนที่ขึ้นกับความถี่จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\varepsilon_1 = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} \int_{BZ} d^3k \frac{f_{ij}^\alpha(\vec{k})}{(\omega_{ij}^2(\vec{k}) - \omega^2)} \quad (2.17)$$

ซึ่ง e และ m คือประจุและมวลของอิเล็กตรอน ทำการหาค่าผลรวม (summation) ครอบ คลุมทุกแถบพลังงาน i และ j โดยที่ $i \neq j$ และทำการอินทิเกรตตลอดทั่วทั้งบริลลูนโซน สำหรับ $f_{ij}^\alpha(\vec{k})$ คือความถี่เชิงแอมพลิจูดของออสซิลเลเตอร์ของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบพลังงาน i และ j ในทิศทางโพลาไรซ์ค่า α มาได้จากสมการที่ (2.45) สามารถทำการประมาณได้สองแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าทำการทดลองวัดได้

จริงโดยการประมาณแบบที่หนึ่งคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตซึ่งจะพิจารณาที่ความถี่ของแสงเท่ากับศูนย์ ส่วนประมาณแบบที่สองคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่แสงที่อยู่ในย่านโปร่งแสง เช่นในย่านที่มีความถี่ในช่วง $\omega < \omega_{ij}$

เพนน์ (Penn) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตของสารกึ่งตัวนำสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้แบบจำลอง อิเล็กตรอนอิสระในแบบไอโซโทรอปิกที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ถ้าประมาณให้ $\hbar\omega_{ij} \approx E_g$ แล้วสมการที่ (2.17) จะกลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum_{i,j} \int_{\text{BZ}} d^3k f_{ij}^\alpha(\vec{k}) \quad (2.18)$$

และ
$$\sum_j \int_{\text{BZ}} d^3k = 4\pi n_v \quad (2.19)$$

เมื่อ n_v คือค่าความหนาแน่นยังผลของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ (effective density of valence electrons) แล้วสมการที่ 2.18 จะลดรูปได้เป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{(\hbar\omega_p)^2}{E_g^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ $\omega_p^2 = 4\pi n_v e^2 / m$ คือค่าความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในการคำนวณหา ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่สูง ถ้ากำหนดให้แถบนำและแถบวาเลนซ์มีอย่างละหนึ่งแถบ (single group of valence and conduction band) แล้วสมการที่ (2.17) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi^2}{m\Omega} \sum_k \frac{f_{cv}^\alpha(\vec{k})}{\omega_{cv}^2(\vec{k}) - \omega^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ Ω คือปริมาตรของผลึก ส่วน c และ v คือแถบนำและแถบวาเลนซ์ ถ้าประมาณว่าการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำในบริดจ์โซนเกิดเป็นออสซิลเลเตอร์และอิเล็กตรอนวาเลนซ์หนึ่งตัวจะทำให้เกิดเป็นออสซิลเลเตอร์หนึ่งตัว ดังนั้นจะประมาณสมการที่ (2.21) ได้ว่าเป็น

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_n \frac{f_n}{(\omega_n^2 - \omega^2)} \quad (2.22)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ทำการรวมส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเข้าด้วยกันโดยที่ยังคงรักษาพจน์ ω^2 จะทำให้ได้ว่าการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยวมีค่าดังนี้คือ

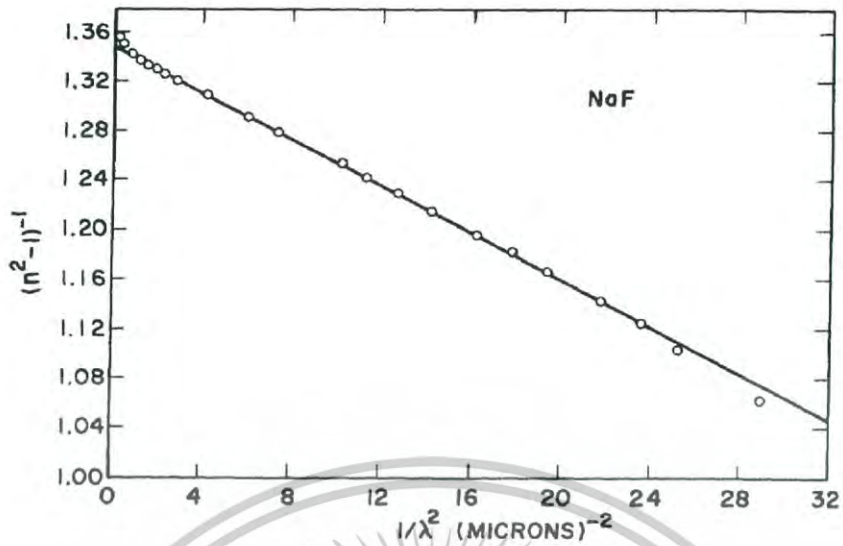
$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx \frac{F}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.23)$$

ซึ่งพารามิเตอร์ E_0 และ F จะสัมพันธ์กับ f_n และ ω_n ของสมการที่ (2.22) จากสมการที่ (2.23) จะทำให้สามารถประมาณหาค่าพารามิเตอร์สองตัวได้ที่พลังงาน $\hbar\omega < \hbar\omega_c$ สมการที่ (2.23) จะมีประโยชน์หรือไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะให้ผลสอดคล้องดีกับสมบัติทางแสงของวัสดุโดยส่วนใหญ่หรือไม่ และพารามิเตอร์ E_0 และ F ที่ได้จากผลการทดลองสามารถสร้างมุมมองใหม่ๆเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆได้หรือไม่ แวมเพิล-ไดโอดเมนนิโคได้ทำการทดลองกับวัสดุมากกว่า 50 ชนิดทั้งที่เป็นผลึกไอออนิกและผลึกโควาเลนต์ของสารประกอบที่ไม่ใช่โลหะอีกทั้งยังได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $E_d = F/E_0$ ซึ่งสอดคล้องกันดีกับการประมาณแบบออสซิลเลเตอร์เดี่ยว สมการที่ (2.23) สามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) ดังนี้คือ

$$n^2(\omega) - 1 = \frac{E_d E_0}{[E_0^2 - (\hbar\omega)^2]} \quad (2.24)$$

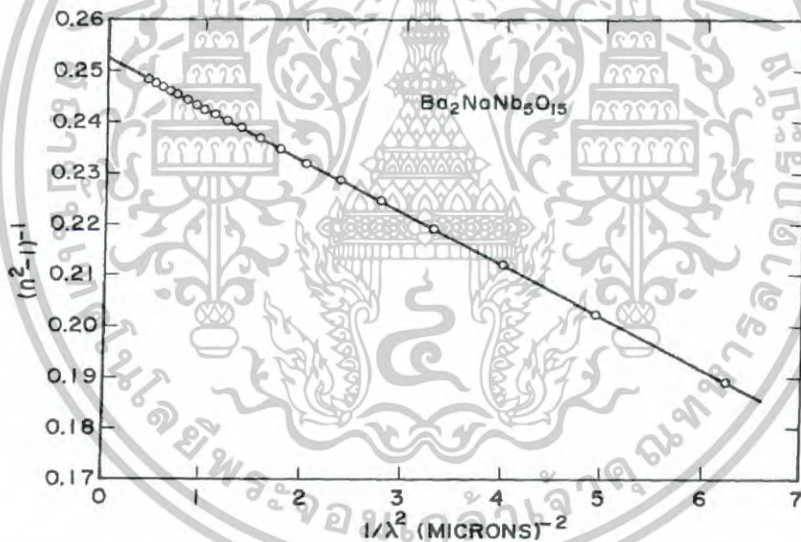
จากสมการที่ (2.24) ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2 - 1)^{-1}$ กับ ω^2 แล้วจะได้ค่าความชันคือ $1/E_d E_0$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ E_0/E_d ตัวอย่างสมการที่ (2.24) ของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF, $Ba_2NaNb_5O_{15}$ และ CdS จะแสดงดังรูป 2.13-2.15 ที่ความยาวคลื่นยาว (long wavelength) เส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงเนื่องจากการสั่นไหวของแลตทิซที่ส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารประกอบ NaF สำหรับกรณีที่ความยาวคลื่นสั้นเส้นกราฟจะเบี่ยงเบนไปจากแนวเส้นตรงในลักษณะที่มีความโค้งอีกแบบหนึ่งเนื่องจากการดูดกลืนแสงของช่องว่างแถบพลังงานหรือเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ดังปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ

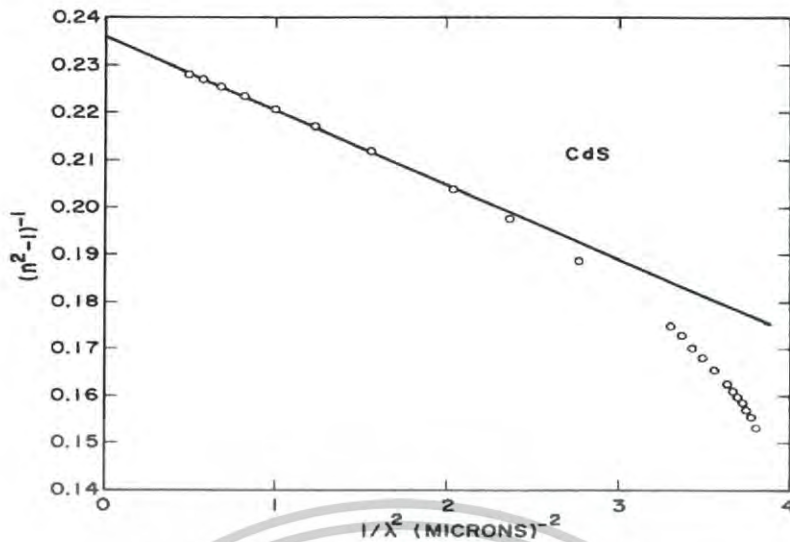
NaF



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารประกอบ

Ba₂NaNb₅O₁₅

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ ค่า λ^{-2} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS

ความเชื่อมโยงระหว่างค่าพารามิเตอร์ E_0 กับ E_d ของออสซิลเลเตอร์เดียวกับสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้จากสมการที่ (2.15) กับสมการที่ (2.16) ผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในพจน์ของโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง $\epsilon_2(\omega)$ ได้มีการนิยามโมเมนต์ที่ r ของค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสงดังนี้คือ

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_i}^{\infty} E^r \epsilon_2(E) dE \quad (2.25)$$

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.26)$$

และ

$$E_d^2 = \frac{M_{-3}}{M_{-3}} \quad (2.27)$$

พลังงานออสซิลเลเตอร์ E_0 จะไม่ขึ้นกับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_0 นี้คือค่าเฉลี่ยของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในขณะที่ E_d จะขึ้นอยู่กับ $\epsilon_2(\omega)$ และ E_d จะทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำ เนื่องจากโมเมนต์ที่ M_{-1} กับ โมเมนต์ที่ M_{-3}

จะเกี่ยวข้องกับ E_0 และ E_d การให้น้ำหนักแก่ค่าโมเมนต์ของสเปกตรัมของไดโพลโมเมนต์ขั้วคู่ทางแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_2(\omega)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเข้าใกล้ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน จากการเปรียบเทียบสมการที่ (2.28) และ (2.29) กับสมการที่มีปริมาณ $\hbar\omega_p$ และ E_g ของแบบจำลองฟิลิปส์แล้วพบว่า

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (2.28)$$

และ
$$E_g^2 = \frac{M_1}{M_{-1}} \quad (2.29)$$

ดังนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิลิปส์ (E_g) คืออัตราส่วนของโมเมนต์ที่ M_1 ต่อโมเมนต์ M_{-1} (ดังสมการที่ (2.29)) ในแบบจำลองของฟิลิปส์ความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำจะอธิบายโดยพลังงานพลาสมา M_1 แต่สำหรับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวจะใช้ M_{-1}/M_{-3} เพื่ออธิบายความแรงของการย้ายสถานะพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบนำดังกล่าว

โฮปฟิลด์ (Hopfield) ได้พัฒนาวิธีการใหม่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางแสงของวัสดุกับลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์และโฮปฟิลด์ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ E_a โดยนิยามว่า

$$E_a^2 = M_3 / M_{-1} \quad (2.30)$$

และแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงาน E_a นี้ จะสัมพันธ์กับค่าอินทิกรัลของผลคูณระหว่างค่าลาปลาเซียนของศักย์ไฟฟ้าของผลึกกับความแปรปรวนของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ค่า E_0 , E_g และ E_a ความสมมาตรได้อย่างชัดเจนดังสมการที่ (2.26), (2.29), (2.30) และยังแสดงให้เห็นว่า

$$E_i < E_0 < E_g < E_a \quad (2.31)$$

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในวัสดุตัวกลาง (media) อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมจะโพลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนแกนกลาง (ion core) โดยประมาณว่าทุกๆ อะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลเตอร์ชนิดเดียวกันเพียงพอกจากแบบจำลองของเวมเพลและโดโตเมนนิโค (Wemple - Di - Domenico) ในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าช่องแถบพลังงาน ฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหจะแสดงได้ดังสมการ

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

หรือ
$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (h\nu)^2 \quad (2.32)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.32) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (2.33)$$

และ

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) และ (2.35) สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_v \quad (2.35)$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

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

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

N_v = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.36)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (2.37)$$

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

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (2.38)$$

เมื่อ

$$n^* = n - ik \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ที่ k คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient) ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.40)$$

โดยที่ $\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.41)$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.42)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้คือ

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

เมื่อ $\sigma_1 = \omega\epsilon_2\epsilon_0 \quad (2.43)$

และ $\sigma_2 = \omega\epsilon_1\epsilon_0 \quad (2.44)$

2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ตุสิต, 2535)

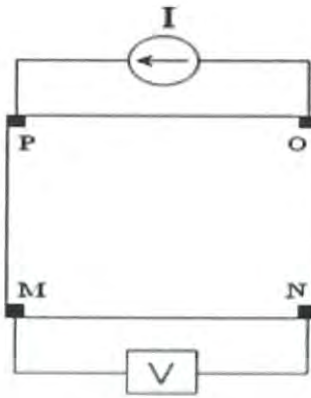
จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.8.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่างรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ (NSTDA) ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.17 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค
แวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว $P-O$ ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว $M-N$ จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.15)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.45)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว $P-M$ แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว $O-N$ จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.46)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.46)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.47)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

$$\text{โดย} \quad f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.49)$$

เมื่อ d คือความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

2.8.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.18 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A เป็นบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.50)$$

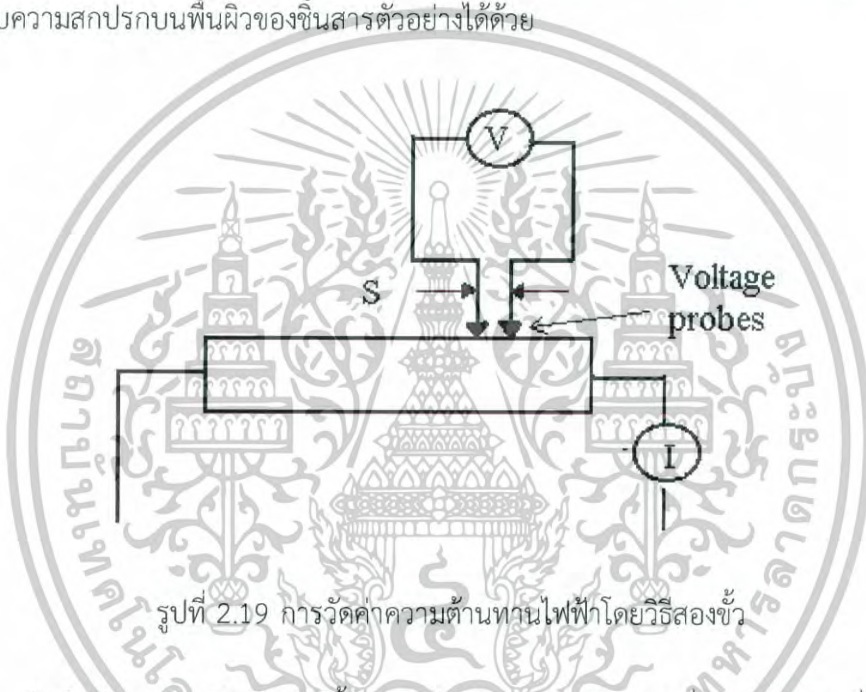
$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.51)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้น มีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูอาจารย์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและไม่ควรทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต หากมีความต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ดี (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) ตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

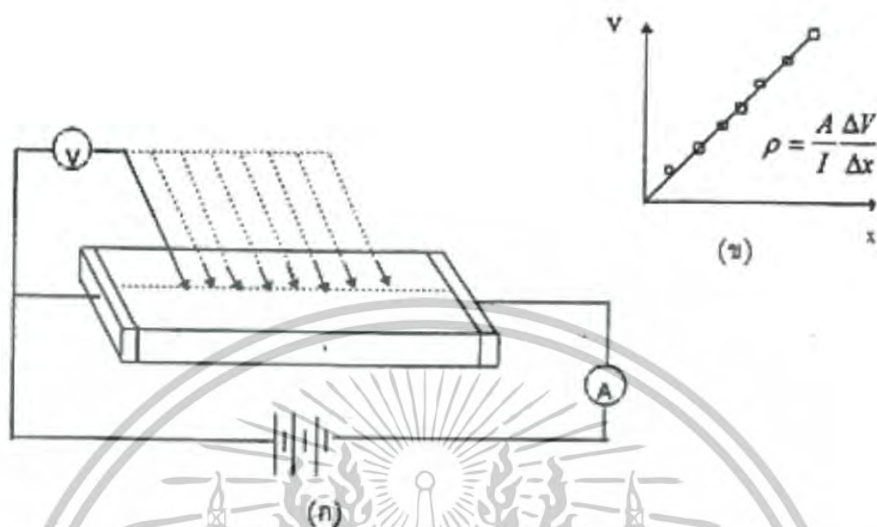
2.8.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.19 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร 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 การวัดควรใช้วิธีที่ขั้วหนึ่งไว้ไม่และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราสวณบอกระยะและนำมาเขียนกราฟตั้ง

รูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.8.4 ปรัชญาการณฮอสส์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.52)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.53)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริง คือ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{I}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.54)$$

- เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือความหนาแน่นของโฮลอิสระ
 μ_e และ μ_p คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.52) และ (2.53) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

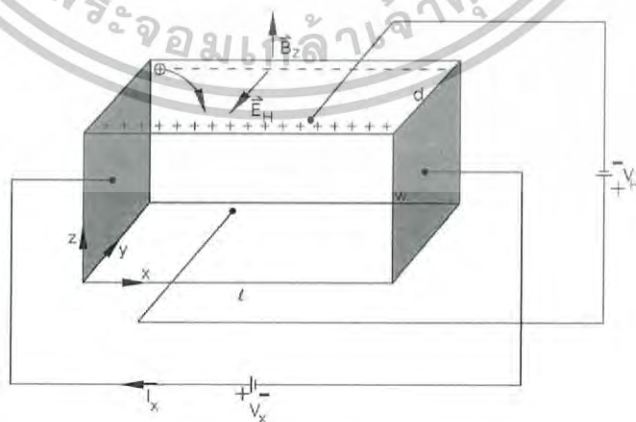
$$n = \frac{I}{er\mu_e} \quad (2.55)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{I}{er\mu_p} \quad (2.56)$$

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



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน V_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.57)

จาก
$$I = nqVA$$

ดังนั้น
$$I_x = qnV_x (wd) \quad (2.57)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.58)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.59)$$

จากรูปที่ 2.21

$$A = w \cdot d \quad (2.60)$$

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

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.61)$$

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) ขึ้น ทำให้กลุ่มพาหะข้างมากชนิดโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(V_x \times B_z) + qE_y \quad (2.62)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $E_y = V_H = \frac{I_x}{qn} \cdot \frac{B_z}{wd}$ ให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.63) ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาสมการที่ (2.63) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.64)$$

เมื่อ $J_x = \frac{I}{wd}$ (2.65)

แล้ว $R_H = \frac{E_y}{J_x \cdot B_z} = \frac{I}{qn}$ (2.66)

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

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{I \cdot I_x B_z}{qn \cdot d} \quad (2.67)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x \cdot \frac{d}{B_z}} \quad (2.68)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{I}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.69)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ $\tau = \tau(E)$ ถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีภา (2.70) ซ์

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.71)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.72)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.73)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนในซิมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \quad (2.74)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.72) และ (2.73) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าหรือ จากสมการที่ (2.69) และ (2.70) ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_X} \cdot \frac{d}{B_Z} \cdot \frac{I}{\rho} \quad (2.76)$$

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

2.8.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิทย์, 2530; จิตินัย, 2531; งามนิทย์, 2545; จิตินัย, 2550; จิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; จิตินัย, 2552; วีระชัย, 2547; ตูสิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.77)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right). \quad (2.78)$$

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

D คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

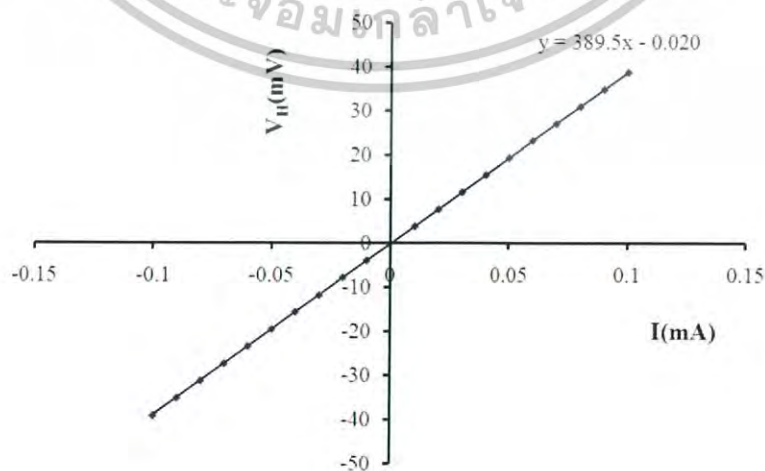
จากสมการที่ (2.78) จะได้ว่า

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

(2.79)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.22 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.80)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.81)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมชั้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชั้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.9 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.9.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \text{ โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.82)$$

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
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \text{ กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.83)$$

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^4 กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิเพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.9.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.9.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็วส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้กับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวินเกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง



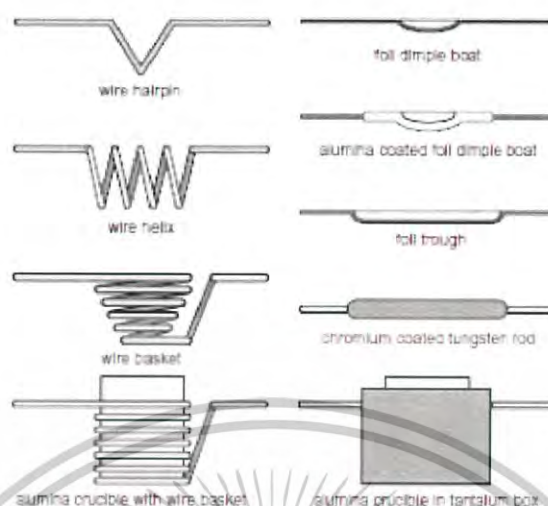
รูปที่ 2.24 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.9.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูงแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Resistance Heated Evaporation Sources



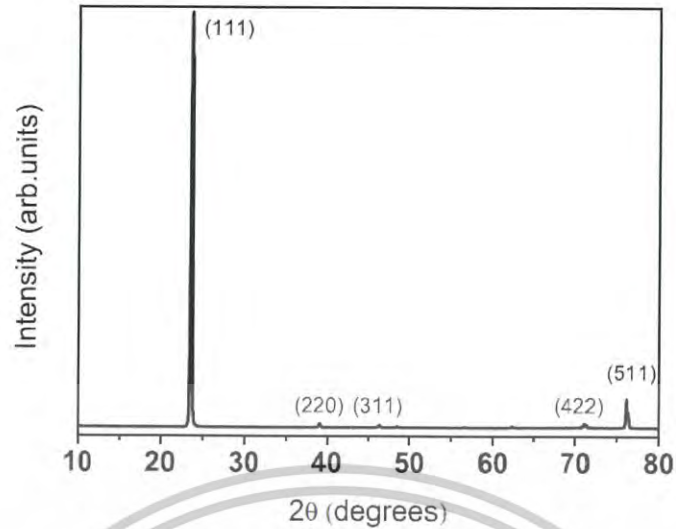
รูปที่ 2.25 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 การเตรียมข้อต่อกึ่งไดโอดของฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธ์ CdZnTe สำหรับการตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ต (Liangmin Cai, Linjun Wang*, Jian Huang, Beiling Yao, Ke Tang, Jijun Zhang, Kaifeng Qin, Jiahua Min, Yiben Xia. 2012)

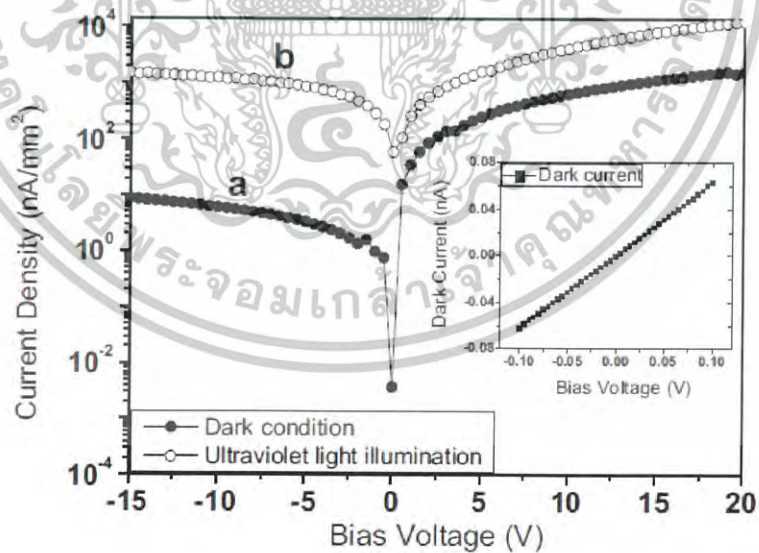
ฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธ์ CdZnTe ที่มีความหนา 25 – 150 ไมโครเมตร มีสภาพต้านทานสูงถึง $3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ที่ถูกปลูกบนกระจก SnO₂ เจือด้วยฟลูออรีน โดยวิธีการระเหยระยะประชิด คุณสมบัติของ Polycrystalline CdZnTe film ศึกษาด้วยเทคนิค XRD, SEM และ EDS ตามลำดับ CdZnTe film Schottky diode detector ยังได้รับการประดิษฐ์และการตรวจสอบ โดยใช้วิธี กระแส-แรงดัน และความจุ-แรงดัน ค่าความหนาแน่น Photo-current ของอุปกรณ์ประมาณ 1508.69 nA/mm² ภายใต้การส่องสว่าง (ความยาวคลื่น=260 นาโนเมตร) ที่ใช้แรงดันไฟฟ้า -15 โวลต์ ผลการศึกษาพบว่า ฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธ์ CdZnTe เป็นที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการตรวจจบบัณฑิตอัลตราไวโอเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของผลึกพหุพันธ์ CdZnTe

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdZnTe ถูกทำที่อุณหภูมิห้องเพื่อแยกแยะ (Identify) โครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.28 พีคที่ตำแหน่ง 23.66, 39.46, 46.62, 71.56, 76.68 องศา คือระนาบ (111), (220), (311), (422), (511) ตามลำดับ มีการสังเกต full-width at half-maximum (FWHM) วัดที่พีค (111) ได้ 0.242 การปรับตำแหน่ง (111) และพีคให้ FWHM ต่ำบ่งบอกถึงความเป็นผลึกที่ดีของฟิล์ม



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไบอัส ของซอตต์กีไดโอด Au/CdZnTe (a.) แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไบอัสภายใต้ความมืด (b.) แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับแรงดันไบอัสภายใต้การส่องสว่าง ($\lambda=260$ nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้น CdSe และ ZnSe 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 มิลลิเมตร
4. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปอลดประจุ
 - 9.3 อะซิโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ 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 ZnSe บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
7. **ขั้นตอนตั้งสารเคมี**

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่ใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

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

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

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

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

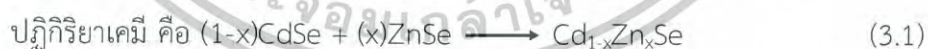
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

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

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ องค์ประกอบต่างๆ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1 ตามลำดับ) เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1.0$)



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnSe จำนวน 1 กรัม ตามตารางที่ 3.1 บดคลุกเคล้าให้เข้ากันในครกอากาศเป็น

มวลอะตอมของ Cd = 112.40 กรัม/โมล
 Zn = 65.39 กรัม/โมล
 Se = 78.96 กรัม/โมล

มวลโมเลกุลของ CdSe = 191.36 กรัม/โมล
 ZnSe = 144.35 กรัม/โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x=0.00$

ใช้ CdSe จำนวน 1.00 กรัม

กรณี $x=0.20$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } \text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Se} &= (0.8 \times 112.40) + (0.2 \times 65.39) + 78.96 \\ &= 181.96 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Se}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdSe} &= \frac{(0.8)(191.36)}{181.96} \\ &= 0.84 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnSe} &= \frac{(0.2)(114.35)}{181.96} \\ &= 0.16 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x=0.40$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } \text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Se} &= (0.6 \times 112.40) + (0.4 \times 65.39) + 78.96 \\ &= 172.56 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Se}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdSe} &= \frac{(0.6)(191.36)}{172.56} \\ &= 0.67 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnSe} &= \frac{(0.4)(114.35)}{172.56} \\ &= 0.30 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี x=0.60

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Se} &= (0.4 \times 112.40) + (0.6 \times 65.39) + 78.96 \\ &= 163.15 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Se}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdSe} &= \frac{(0.4)(191.36)}{163.15} \\ &= 0.47 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnSe} &= \frac{(0.6)(114.35)}{163.15} \\ &= 0.53 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x=0.80

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Se} &= (0.2 \times 112.40) + (0.8 \times 65.39) + 78.96 \\ &= 153.75 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Se}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdSe} &= \frac{(0.2)(191.36)}{153.75} \\ &= 0.25 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnSe} &= \frac{(0.8)(114.35)}{153.75} \\ &= 0.75 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x=1.00

ใช้ ZnSe จำนวน 1.00 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1.0$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x)	CdSe (g)	ZnSe (g)
0.00	1.00	0.00
0.20	0.84	0.16
0.40	0.67	0.33
0.60	0.47	0.53
0.80	0.25	0.75
1.00	0.00	1.00

3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใส

1. ตัดแผ่นกระจกใสให้มีขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร นำไปเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกใสเข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำป้อนประจุ
3. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยน้ำป้อนประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกใสด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้งโดยไม่ต้องถอดกระจกใสออกจากตัวยึดที่ทำด้วยเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็วแล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบๆ
7. นำแผ่นกระจกใสไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
8. เมื่อกระจกใสเย็นตัวเก็บใส่ถุงซิปล็อคแยกจากกันในแต่ละชั้น เพื่อป้องกันกระจกใสติดกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น

3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากอกอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ

1. ใช้สาลีเช็ดผิวภายในภาชนะสุญญากาศและกระจกมองด้านหน้า ผิวหน้าหัววัดความหนาและชิ้นส่วนภายในอื่นๆด้วยอะซิโตน ยกเว้นโอรังบริเวณฐานของระบบสุญญากาศจะต้องเช็ดด้วยเมทานอลเพราะหากเช็ดด้วยอะซิโตนอาจทำให้โอรังเสียหายได้
2. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหน้ากอกอะลูมิเนียมด้วยอะซิโตนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3. ซึ่งสารเคมีตามปริมาณ ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเคลือบฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ตามองค์ประกอบ $x=0.0$ และ 1 ตักสารตั้งต้นให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้น (boat) ที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี
- การเคลือบฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ตามองค์ประกอบ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม

3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากอกอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 17 เซนติเมตร
2. ตักสารตั้งต้นใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี
3. วางแผ่นหน้ากอกอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้นลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ
4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากอกอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ที่ปลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบระดับวัดอุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบล้างอากาศออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ 3×10^{-5} ถึง 4×10^{-5} มิลลิบาร์
6. ใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าทีละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 100-150 แอมแปร์ ในขณะที่สารตั้งต้นจะเริ่มระเหิด ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณสารตั้งต้นและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นสารตั้งต้นระเหิดจนหมด ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศและนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้อตุ๋นความชื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$

3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมีมุม 2θ เริ่มจาก 20-70 องศา นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกขนาดของเกรน และตรวจสอบระนาบผลึกที่ปรากฏ

3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ 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 $Cd_{1-x}Zn_xSe$
2. ต่อปลายลวดตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง Keithley รุ่น 236
3. โบนแอสแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง โดยขนาดของแรงดันโบนแอส จะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำจากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าไปคำนวณหาความต้านทานไฟฟ้า
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 $\rho_B = \frac{RA}{l}$ โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $w \cdot d$ และ d คือ ความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐาน ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.0$ มีลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางเป็นสีน้ำตาลแดงเข้ม และเมื่อ $x \geq 0.2$ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางมีสีอ่อนลงตามลำดับจนถึงที่ค่า $x = 1$ พบว่าผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะเป็นสีเหลือง ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมแสดงดังรูปที่ 4.1



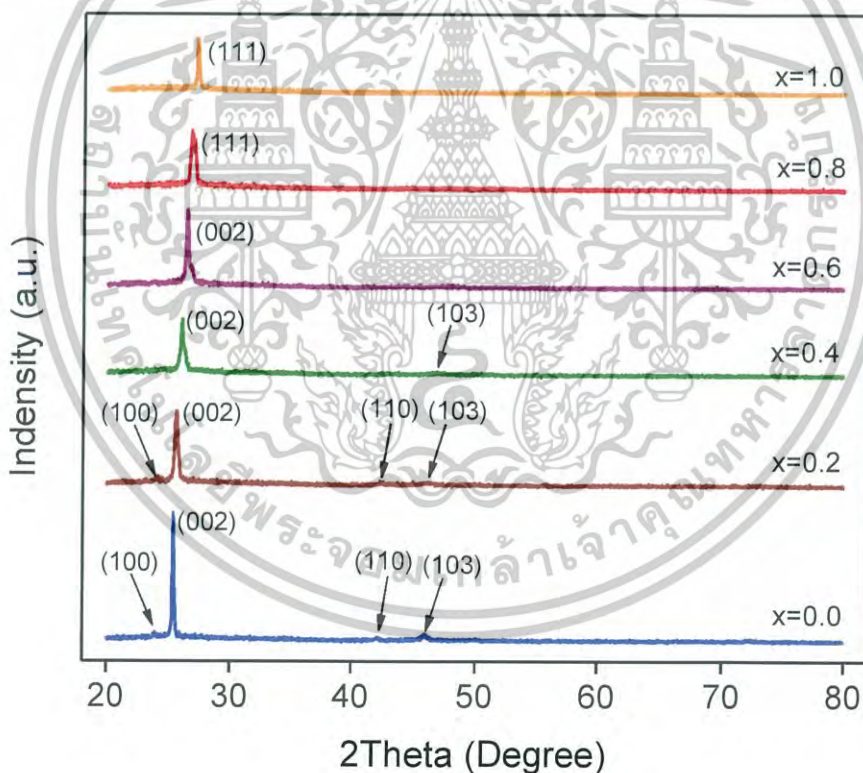
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้าง ผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำว่ามี การเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพีคความเข้มมาตรฐาน



รูปที่ 4.2 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

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

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

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($0.0 \leq x \leq 0.4$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เมื่อ ($x = 0.6$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสผสมและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและเฮกซะโกนัล และเมื่อ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

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

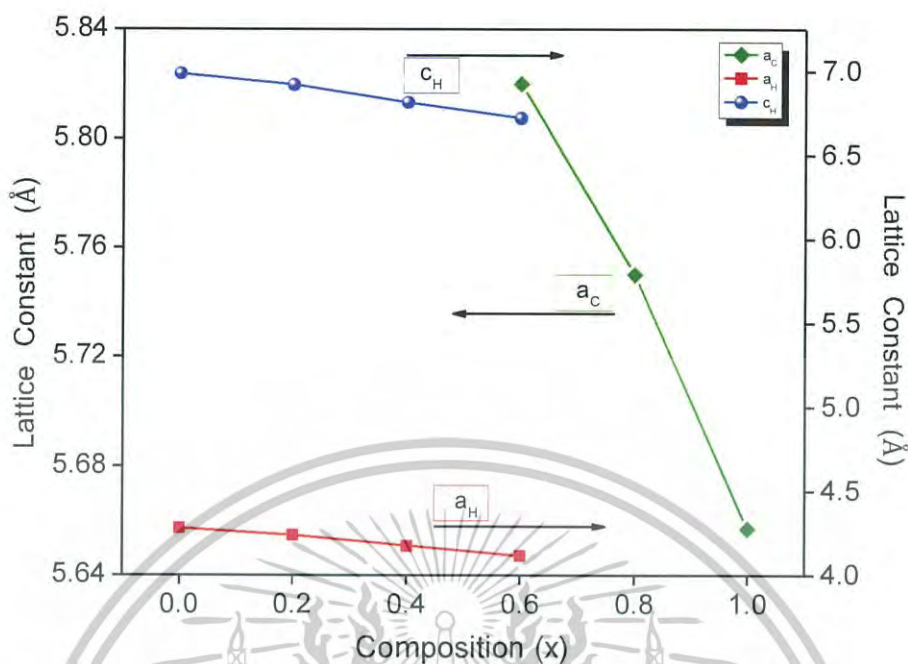
เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_H , c_H กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

จาก $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ (4.3)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_H , c_H และ a_c กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากกฎของแบรกก์

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

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

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

แล้วจะได้ว่า

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

หรือ

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

ส่วนระบบผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะได้ว่า

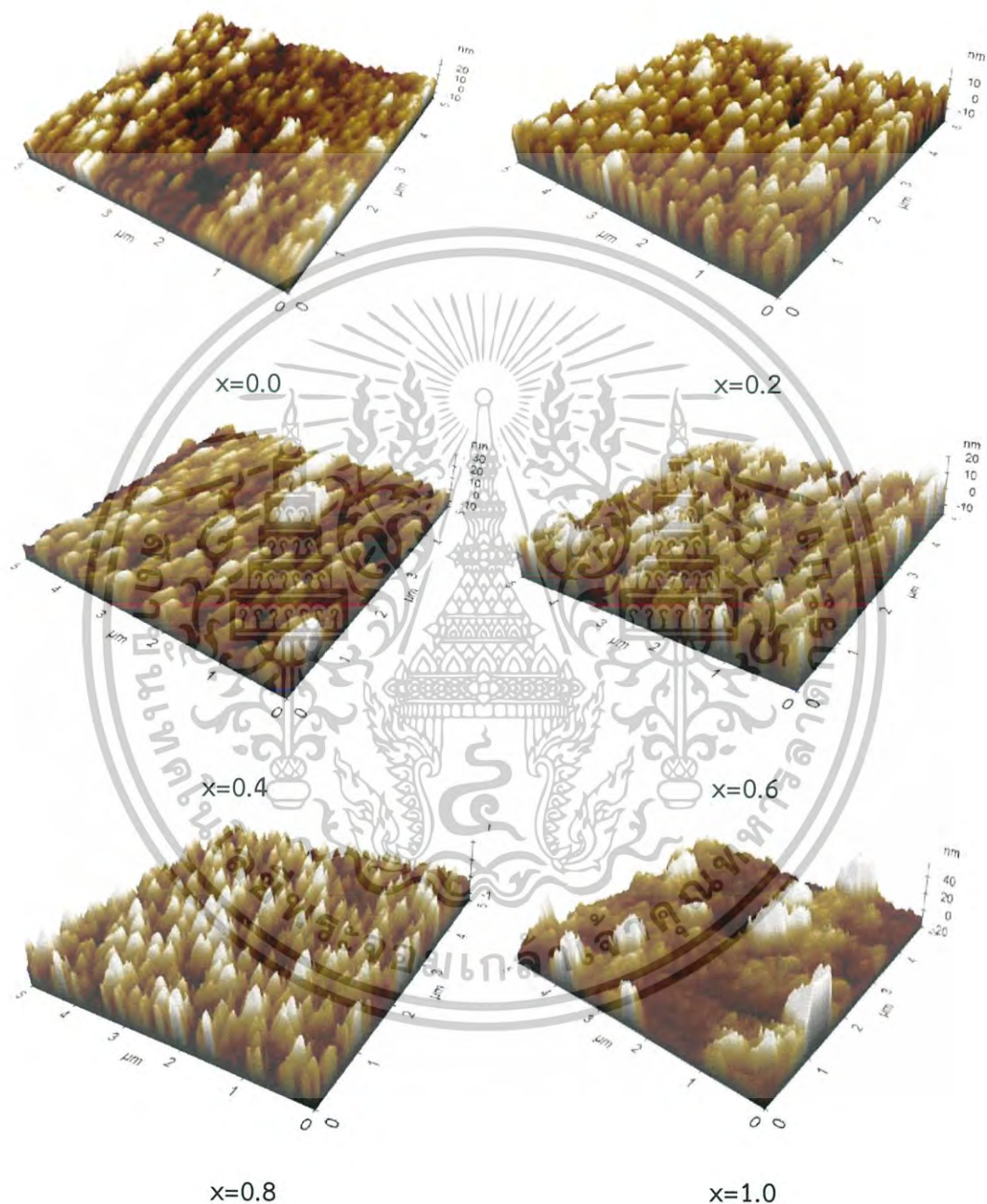
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดต่อ แก้ไข หรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) 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	Hexagonal (Single)	24.025	100	-	4.278	6.985	106.40	8.833×10^{13}	1.544×10^{-3}
		25.482	002						
		42.125	110						
		46.025	103						
0.2	Hexagonal (Single)	24.250	100	-	4.237	6.918	56.73	3.107×10^{14}	2.865×10^{-3}
		25.733	002						
		42.325	110						
		46.150	103						
0.4	Hexagonal (Single)	26.133	002	-	4.173	6.814	65.52	2.329×10^{14}	2.444×10^{-3}
		46.90	103						
0.6	Hexagonal	26.506	002	-	4.115	6.720	80.18	1.555×10^{14}	1.945×10^{-3}
	Cubic	26.825	111						
0.8	Cubic (Single)	26.832	111	5.750	-	-	39.68	6.353×10^{14}	3.933×10^{-3}
1.0	Cubic (Single)	27.284	111	5.657	-	-	100.45	9.911×10^{13}	1.528×10^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

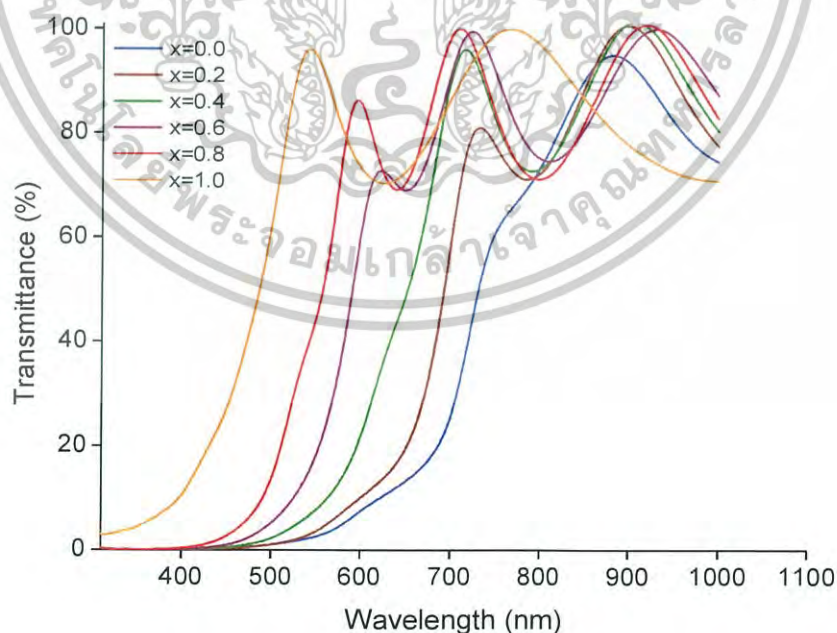
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Roughness (nm)	Grain Size (nm)
0.0	4.951	176
0.2	4.999	156
0.4	5.452	186
0.6	5.031	127
0.8	5.357	166
1.0	10.181	176

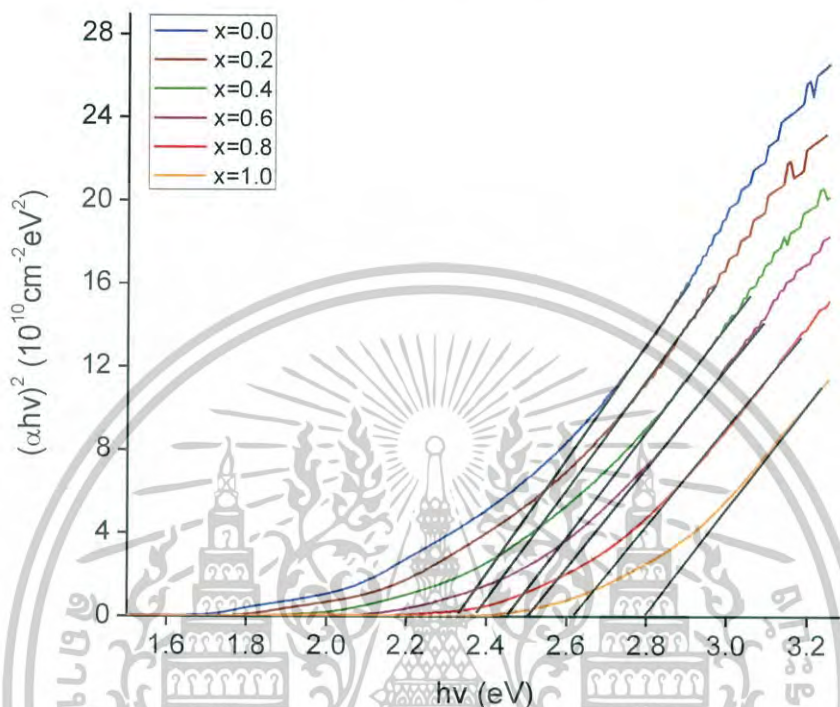
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยทำการลากเส้นตรง การประมาณค่า(extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdSe และ ZnSe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ในเชิงทางการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จาก การวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังความสัมพันธ์

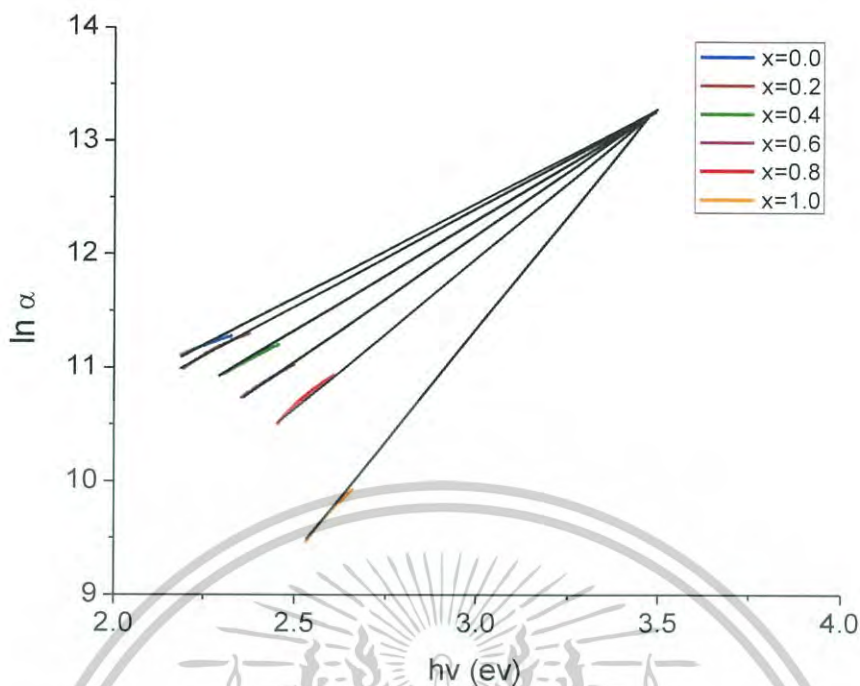
$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{hv}{E_t}\right)$$

เมื่อ E_t คือ ความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก

α คือ ค่าคงตัว

ดังนั้น E_t จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน (hv) ในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อ $\ln \alpha = \left(\frac{1}{E_t}\right) hv + \ln \alpha_0$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) เพื่อหาค่าความกว้างของ ส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศ

สมการส่วนหางของแถบพลังงานอาจเขียนได้ในแบบดังนี้ คือ

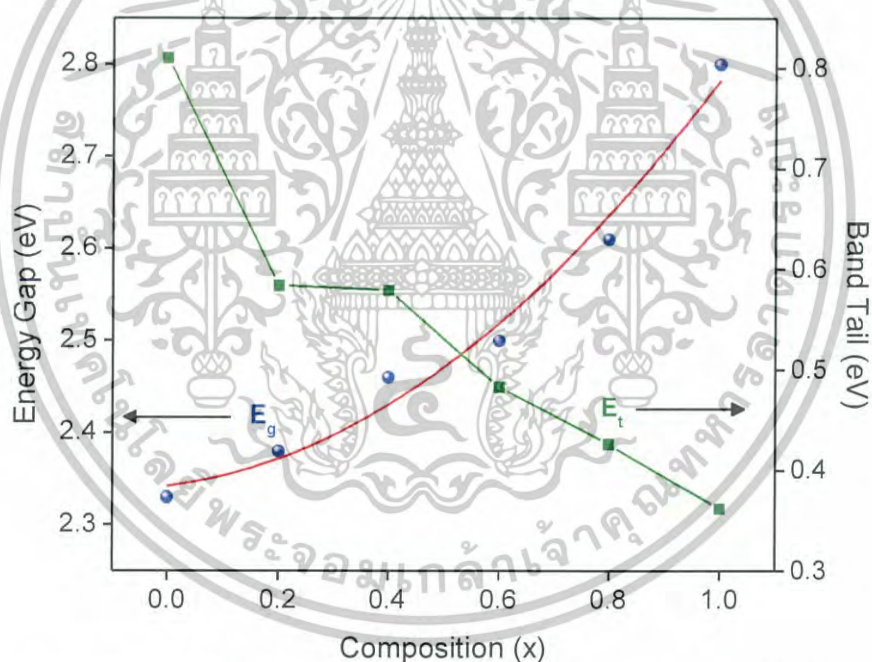
$$\ln \alpha = \alpha_0 \exp \left(\frac{h\nu - E_0}{E_T} \right)$$

โดยที่ E_0 และ α_0 เป็นโคออร์ดิเนตของจุดตัดของเส้นตรงที่ลู่ออกเข้าหากัน โดยพบว่า E_0 และ α_0 มี ค่าเท่ากับ 3.50 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 5.85×10^5 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน และค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdSe และ ZnSe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%

Composition (X)	Energy gap (eV)	Band Tail (meV)
0.0	2.33	810
0.2	2.38	584
0.4	2.46	579
0.6	2.50	483
0.8	2.61	426
1.0	2.80	362



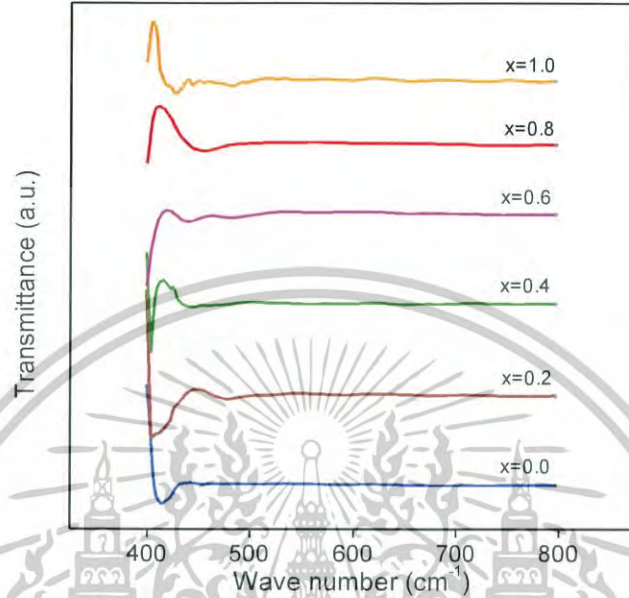
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ในแบบสมการกำลังสองดังนี้ คือ

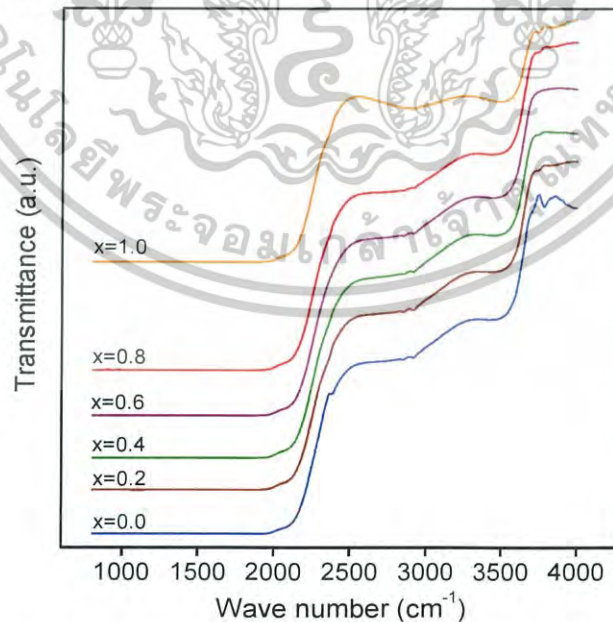
$$E_g = 2.342 + 0.074x + 0.366x^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ค่าพารามิเตอร์ความโค้ง (bowing parameter) เท่ากับ 0.366

4.3.2 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรด ด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 800 – 1000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400 – 800

ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นผ่านอินฟราเรดของย่านกลาง (Middle infrared) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Peaks of FTIR (cm^{-1})	Phase	Assignment Vibration Modes	Reference
0.0 (CdSe)	414.6		Cd-O bending	Ivashchenko, 2015
	453.2		Cd-Se stretching	Das, 2015
	2852, 2921	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
		(O-H) molecule groups		Gul, 2014
3776	absorbed H ₂ O	O-H stretching	Ghosh, 2012	
0.2	455		Cd-Se stretching	Das, 2015
	503.3			
	545.8			
	727		Cd-Se stretching	
	2850, 2923	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
(O-H) molecule groups			Gul, 2014	
0.4	404		Zn-O stretching	Boyadjiev, 2016
	475		Cd-Se stretching	Das, 2015
	590			
	2848, 2915	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
(O-H) molecule groups			Gul, 2014	
0.6	437		Cd-O stretching	Ivashchenko and Opanasyuk, 2015
	482		Cd-Se stretching	Das, 2015
	651		Zn-Se stretching	Ivashchenko, 2015
	2846, 2917	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
(O-H) molecule groups			Gul, 2014	
0.8	425		Zn-O stretching	Boyadjiev, 2016
	443			
	482		Cd-Se stretching	Das, 2015
	597			
	651		Zn-Se stretching	Ivashchenko, 2015; Arslan, 2013

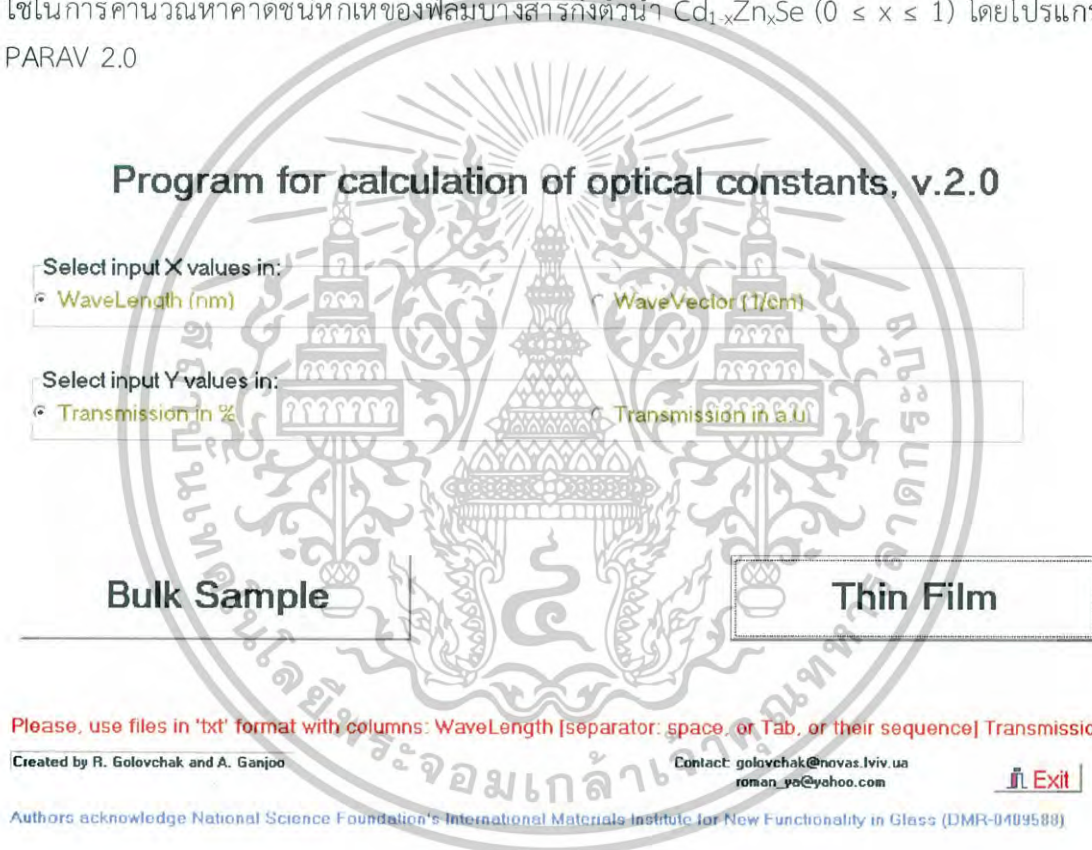
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 597 โดยการสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้งชื่อหรือลิงก์ชื่อของเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์นี้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านอินฟราเรดของย่านกลาง (Middle infrared) ของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (X)	Peaks of FTIR (cm^{-1})	Phase	Assignment Vibration Modes	Reference
0.8(ต่อ)	2844, 2913	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
		(O-H) molecule groups		Gul, 2014
1.0 (ZnSe)	403		Zn-O Stretching	Boyadjiev, 2016
	422		Zn-O Stretching	Boyadjiev, 2016
	444			
	470		Cd-Se stretching	Das, 2015
	644		Zn-Se Stretching	Ivashchenko, 2015; Arslan, 2013
	2852, 2917	ethyl groups	C-H stretching vibration	Huang, 2015; Das, 2015
		glycerol	C-H stretching	Bhosale, 2016
		alkyl chain	CH ₂ stretching vibration	Deo, 2014
		(O-H) molecule groups		Gul, 2014
	3494	Absorbed H ₂ O	O-H stretching	Bhosale, 2016; Das, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

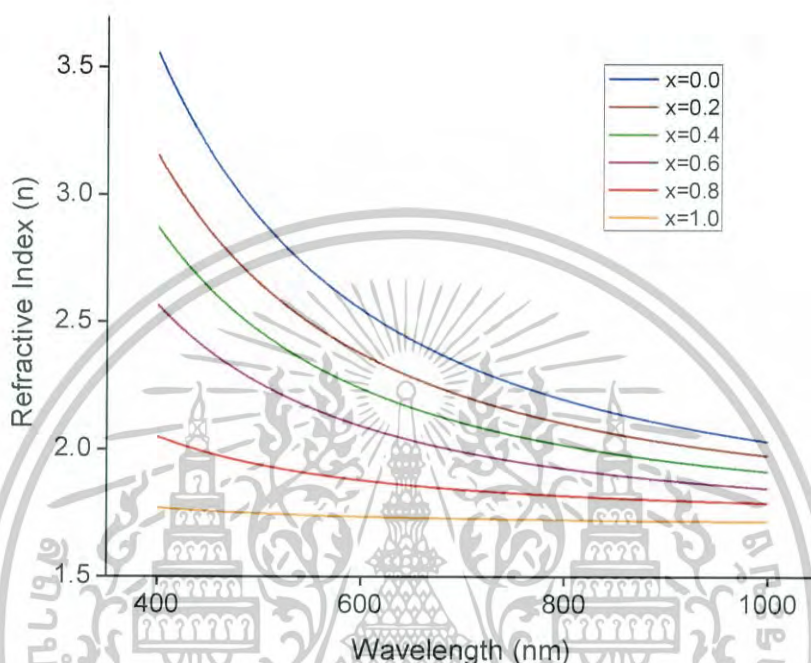
4.3.3 ผลการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจากสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญทางแสงของตัวกลาง ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มนิยามได้จาก ค่าอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ หรือในอากาศ ต่อ ค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ แสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยอัตราเร็ว 3×10^8 เมตรต่อวินาที ส่วนในตัวกลางใด ๆ อัตราเร็วของแสงจะเปลี่ยนไป ถ้าให้ n แทนค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของตัวกลางใด ๆ จะได้ $n=c/v$ โดย c แทนค่าอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศหรืออากาศ และ v แทนค่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงรูปแบบคำสั่งของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยโปรแกรม PARAV 2.0



รูปที่ 4.11 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม PARAV 2.0 ที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

โปรแกรม PARAV 2.0 จะทำการคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยข้อมูลความยาวคลื่นแสงที่สัมพันธ์กันกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ให้อยู่ในช่วง 400-1000 นาโนเมตร โปรแกรม PARAV 2.0 จะต้องอาศัยเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงในรูปแบบของ notepad จึงทำการสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง หลังจากทีโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการ

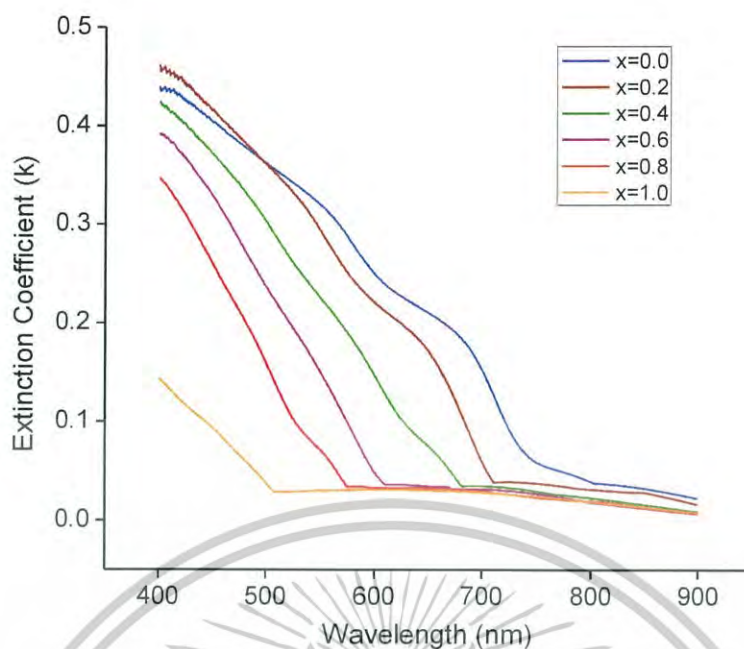
บันทึกเป็นไฟล์ notepad ถูกบันทึกเป็นนามสกุล .txt ภายในไฟล์จะประกอบไปด้วยข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ และค่าแถบช่องว่างพลังงาน ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ข้อมูลของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณเสร็จเพื่อมาหาความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.12-4.18



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีหักเห กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

หากพิจารณาความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) จะแสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าเมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้นแล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะมีแนวโน้มลดลงโดยในช่วงความยาวคลื่นสั้น ๆ (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 650 นาโนเมตร) ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วแต่เมื่อความยาวคลื่นมีค่าสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสูงกว่า 650 นาโนเมตร) แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตามความยาวคลื่นสอดคล้องดีกับสมการคอดี $n = a + (b/\lambda^2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



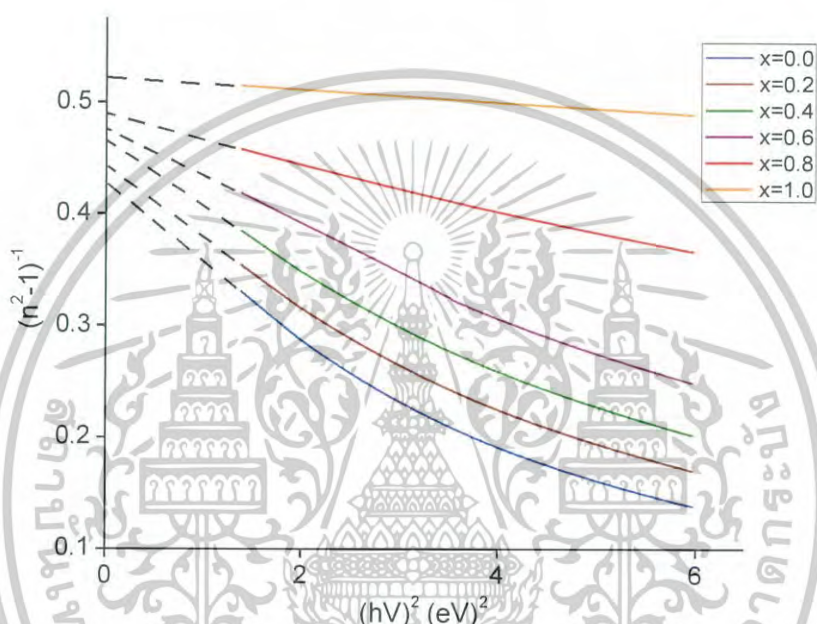
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง โดยรูปทั้งสองมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) แต่เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีค่าลดลงช้า ๆ เข้าสู่ศูนย์นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีบทบาทมากกว่าช่วงพลังงานมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำดังกล่าวและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงจะมีบทบาทลดลงจนน้อยมากเมื่ออยู่ในช่วงที่ความยาวคลื่นแสงมีค่าสูง หรือในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่มีความยาวคลื่นแสงมีค่าต่าง ๆ ดังความสัมพันธ์ $k = \alpha\lambda/4\pi$ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงในช่วงที่มีค่าพลังงานสูงจะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อใช้ในการทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เวมเพิม-โตโดเมนนิโค ได้เป็นผู้นำเสนอแนวคิดแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว โดยจำลองมาจากรูปแบบการสั่นของอิเล็กตรอนในอะตอมรอบๆไอออนแกนกลาง (ion core) ของผลึกนั้น มีรูปแบบเดียวกันทั้งหมด แบบจำลองนี้ใช้หาค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ได้จาก การวิเคราะห์แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว พิจารณาจากรูปที่ 4.1 2-4.14 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(hv)^2$ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเส้นตรงในย่านพลังงานต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน สามารถแสดงฟังก์ชันดิสเพอร์ชันของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะแสดงในสมการ

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

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (hv)^2 \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.7) จะเป็นแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (4.8)$$

และ จุดตัดแกน $y = \frac{E_0}{E_d}$ (4.9)

จากสมการที่ (4.9) และ (4.10) สามารถที่จะหาค่า E_0 และ E_d ได้โดยที่ E_0 คือค่าพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (oscillator energy) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ส่วน E_d คือค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะบอกถึงความแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (strength of interband transition) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_v \quad (4.10)$$

เมื่อ $\beta = 0.26 \pm 0.03$ อิเล็กตรอนโวลต์

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

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

N_v = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อแอนไอออนหนึ่งตัว (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

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

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (4.11)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^2}{M_{-3}} \quad (4.12)$$

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

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} \quad (4.13)$$

เมื่อ $n^* = n - ik$ (4.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n = ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

k = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (extinction coefficient)

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (4.15)$$

โดยที่
$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (4.17)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (optical conductivity; σ) ไว้ดังนี้คือ

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

เมื่อ
$$\sigma_1 = \omega\varepsilon_2\varepsilon_0 \quad (4.18)$$

และ
$$\sigma_2 = \omega\varepsilon_1\varepsilon_0 \quad (4.19)$$

ตารางที่ 4.5 เป็นตารางแสดงผลของการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสงจากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยวซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณ และแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางแสง ค่าพลังงานดิสเพอร์ชันจะมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ M_1 และ M_3 จะมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าคงที่ได้ิเล็กตริกที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (ε_∞) (dielectric constant at higher wavelength) ซึ่งคำนวณได้จากสมการคือ

$$n = a + \left(\frac{b}{\lambda^2} \right) \quad (4.20)$$

เมื่อแทนค่าความยาวคลื่นแสงค่าอนันต์แล้วในพจน์ของ (b/λ^2) มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรด (n_∞) จึงมีเท่ากับ a และจากสมการที่ (4.13) ทำให้ทราบค่าคงที่ได้ิเล็กตริกทางแสงของฟิล์มบางที่ความยาวคลื่นยาวในย่านอินฟราเรดได้

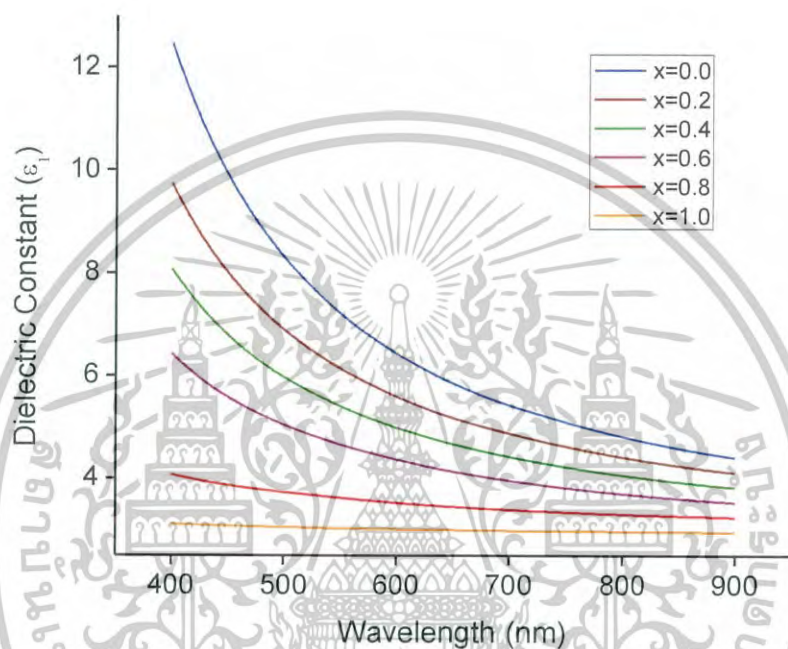
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (X)	$n = a + (b/\lambda^2)$		Wemple-DiDomenico Analysis						E_t	E_g	E_0/E_g	ϵ_L	N/m^* ($\text{cm}^{-3}\text{kg}^{-1}$)
	a	$b(\text{nm})^2$	$E_0(\text{eV})$	$E_d(\text{eV})$	M_1	$M_3 (\text{eV})^{-2}$	$f(\text{eV})^2$	ϵ_∞					
0.0	1.738	2.91×10^5	2.715	6.874	0.395	0.054	18.664	3.021	0.810	2.33	1.165	6.387	2.730×10^{53}
0.2	1.750	2.25×10^5	2.888	6.945	0.416	0.050	20.056	3.063	0.584	2.38	1.213	5.607	2.063×10^{53}
0.4	1.730	1.83×10^5	3.029	6.792	0.446	0.049	20.572	2.993	0.579	2.46	1.231	5.015	1.643×10^{53}
0.6	1.710	1.37×10^5	3.271	6.810	0.480	0.045	22.272	2.924	0.483	2.50	1.308	4.411	1.218×10^{53}
0.8	1.740	4.95×10^4	4.742	9.744	0.487	0.022	46.211	3.028	0.426	2.61	1.817	3.569	4.535×10^{52}
1.0	1.707	2.29×10^4	9.572	18.329	0.522	0.01	175.439	2.914	0.362	2.80	3.418	3.020	8.964×10^{51}

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

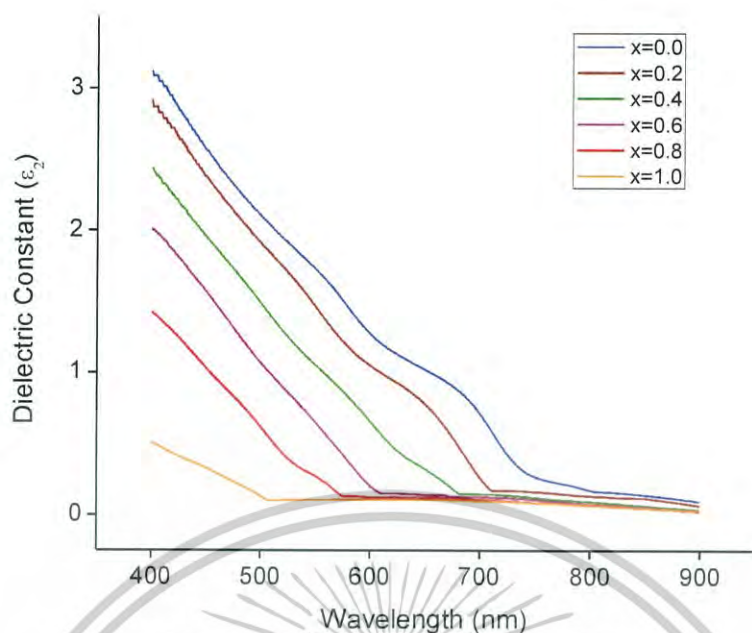
4.3.5 ผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำเชิงซ้อนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่สื่อถึงความมีขั้วของโมเลกุลในเนื้อวัสดุ วัสดุใดที่มีความเป็นขั้วสูงและจะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งจะบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไว้ได้ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ประกอบไปด้วยส่วนจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

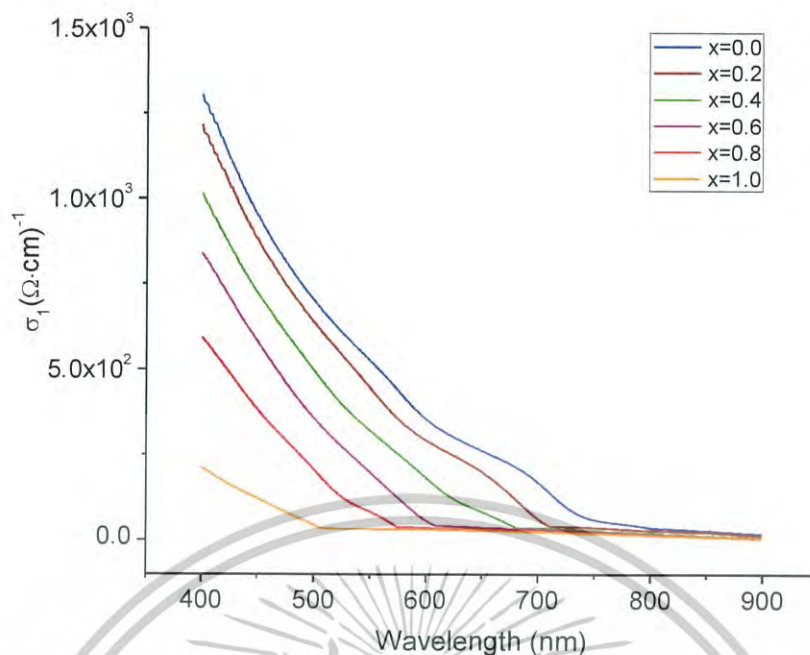


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

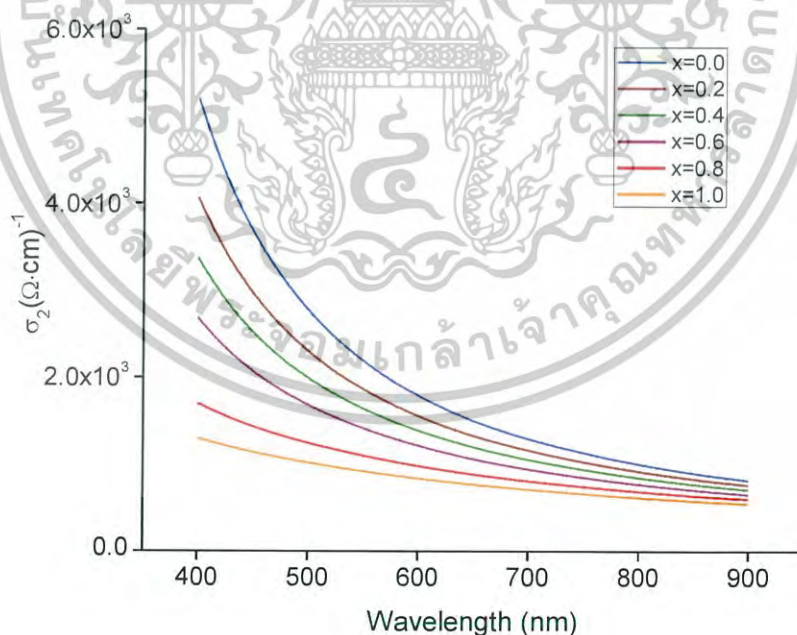
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนจะมีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ศูนย์เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับรูปที่ 4.17 และ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงเชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลของอะตอม (x) ที่แตกต่างกัน พิจารณาที่ความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลของอะตอม (x) เพิ่มขึ้น แล้วจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำเชิงแสงจะมีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาค่าเศษส่วนโดยโมล (x) ค่าใดค่าหนึ่งทั้งจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงตามความยาวคลื่นแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้น

เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าสูงที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งมีความยาวคลื่นแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีการดูดกลืนแสงที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงได้ดี ส่วนจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงความยาวคลื่น 400-900 นาโนเมตร ศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_1) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน (σ_2) กับค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

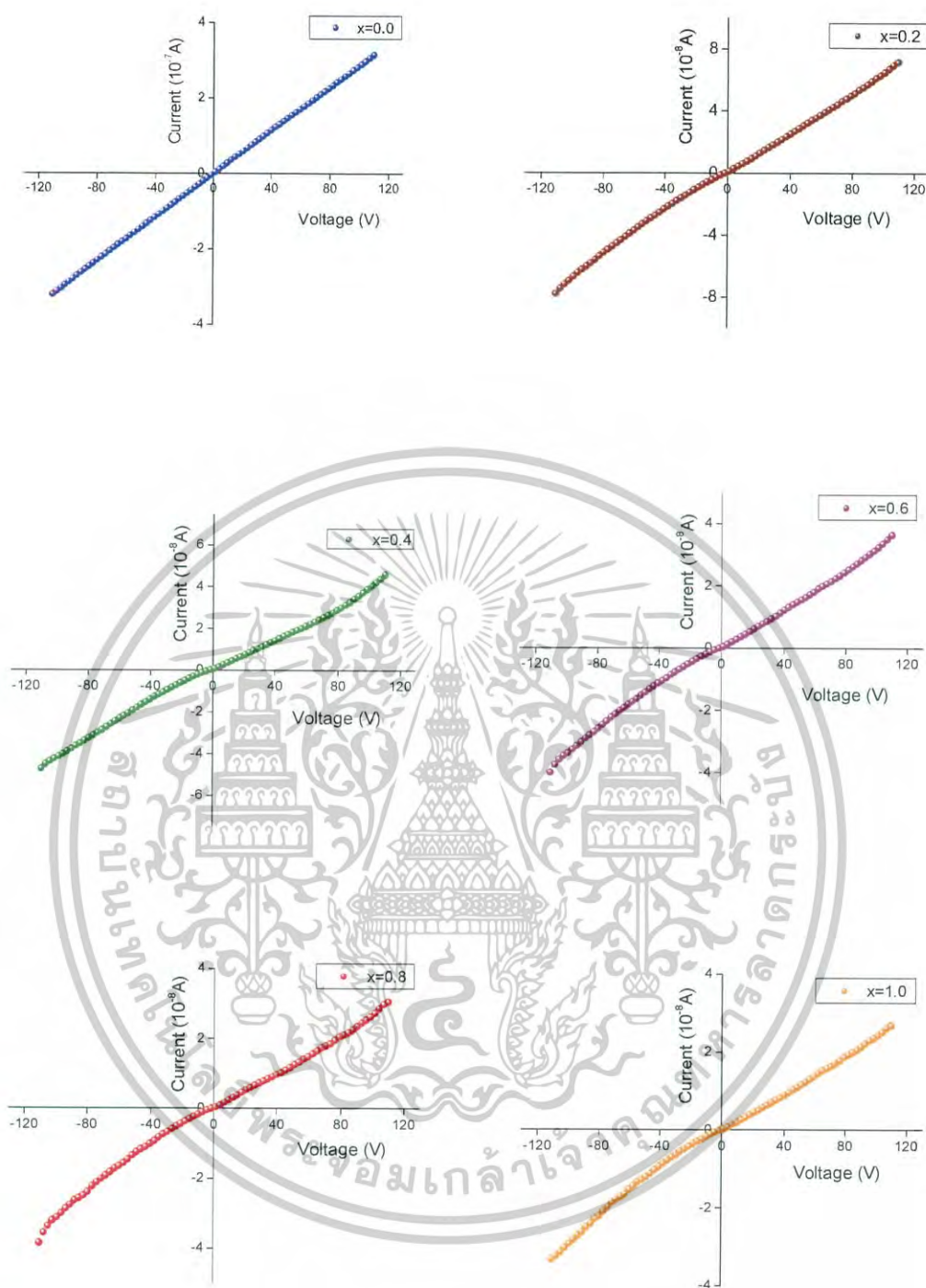
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง วัดภายใต้สนามแม่เหล็กโลกและแม่เหล็กถาวร ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบาง เพื่อใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ

4.2.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) มีความกว้างเป็น w มีความยาว l มีความต้านทาน R และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่น (R_{sq}) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$R_{sh} = R \left(\frac{w}{l} \right) \quad (4.21)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

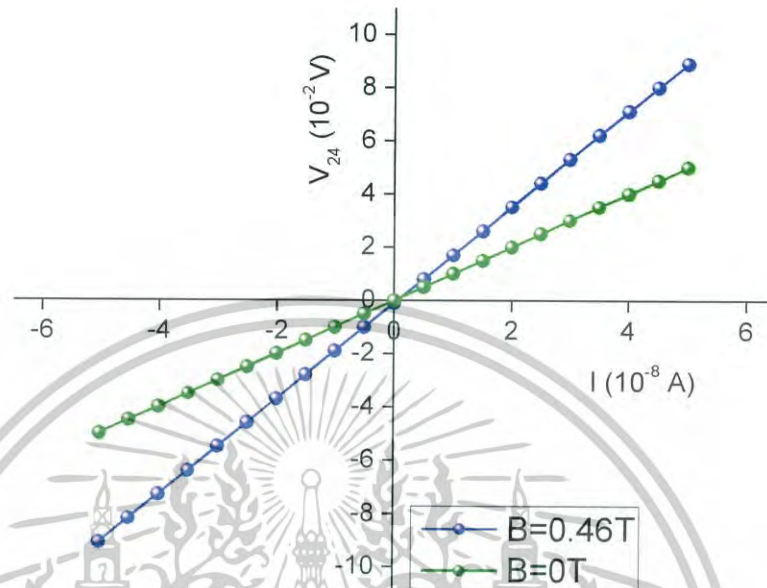
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าแบบแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Sheet resistance (Ω/sq)
0.0	1.39×10^8
0.2	6.20×10^8
0.4	1.02×10^9
0.6	1.25×10^9
0.8	1.42×10^9
1.0	1.56×10^9

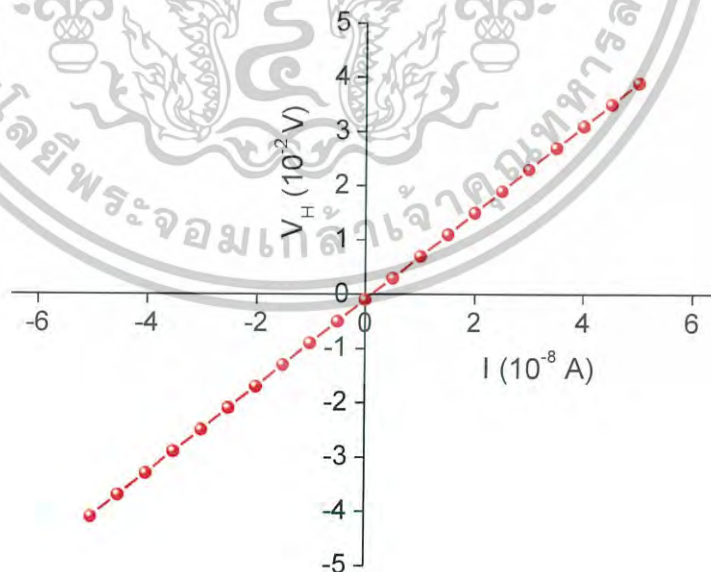


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

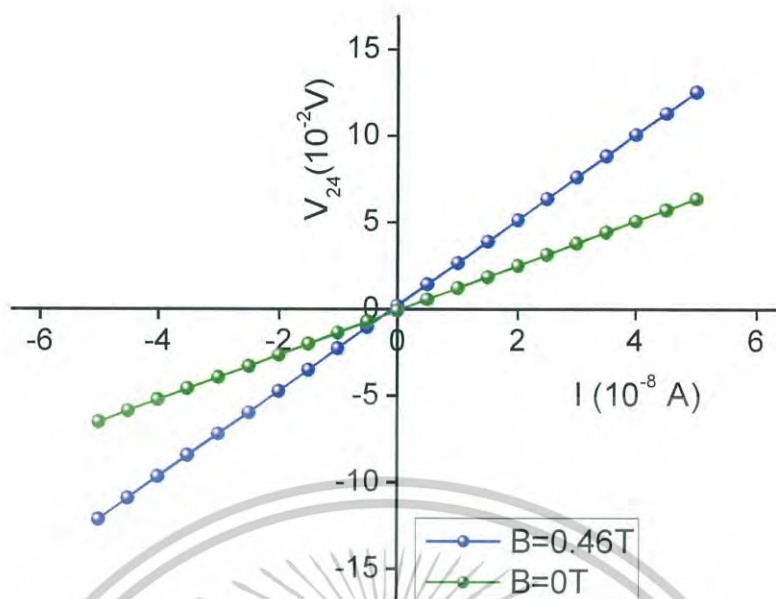
4.2.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางขวางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



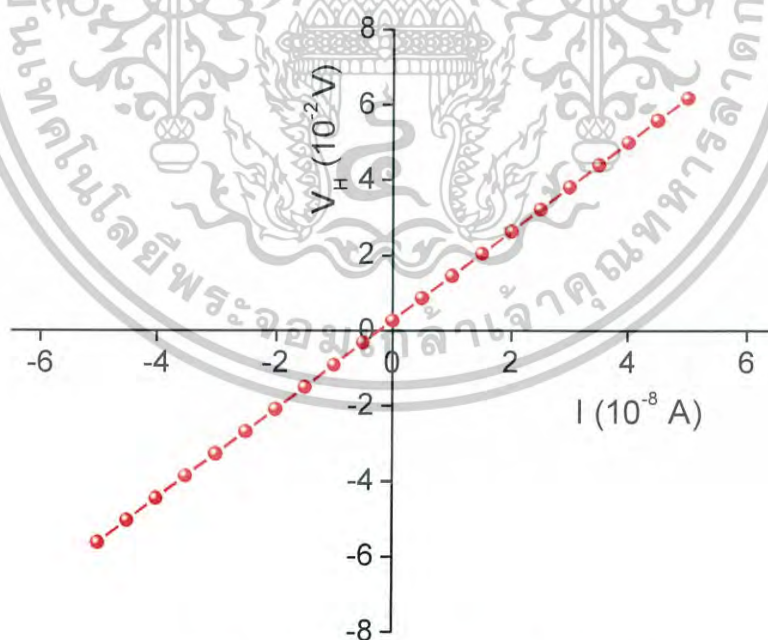
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

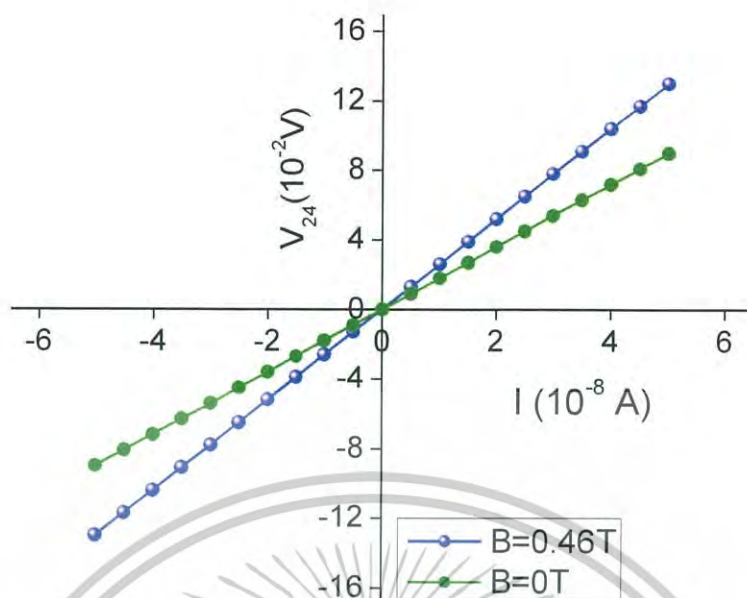


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

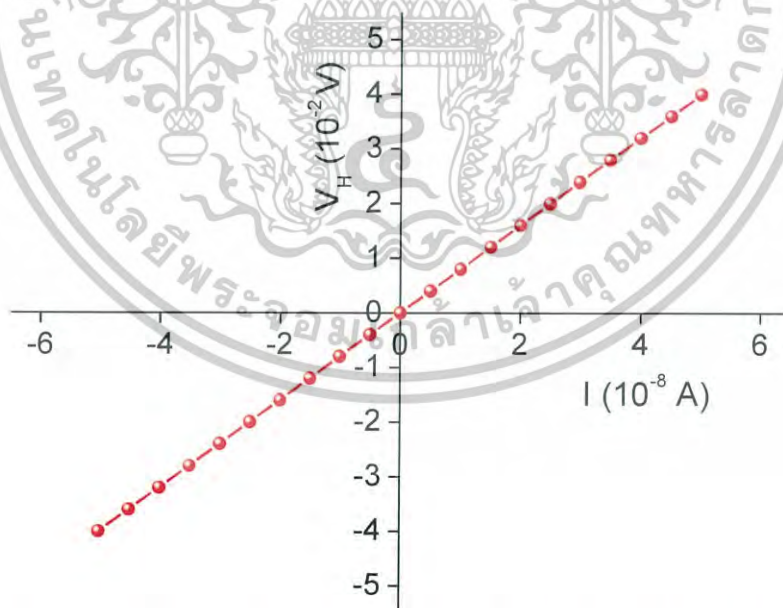


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

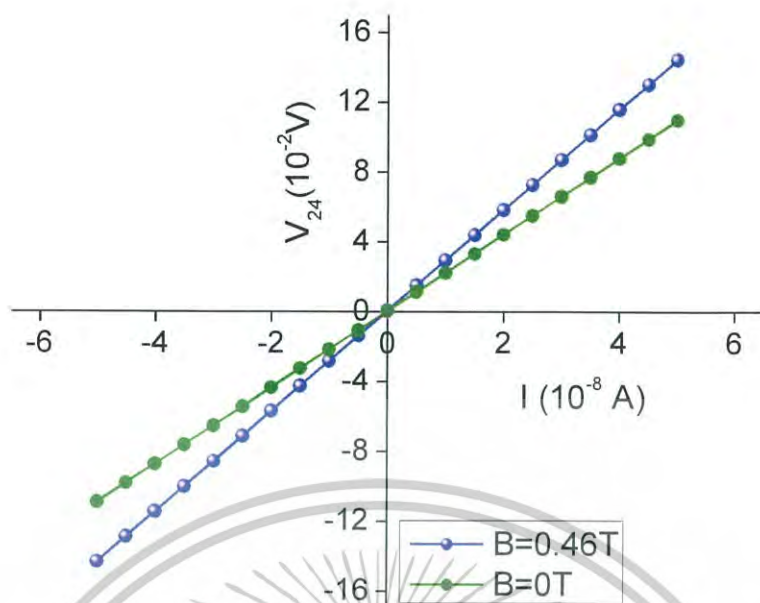
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



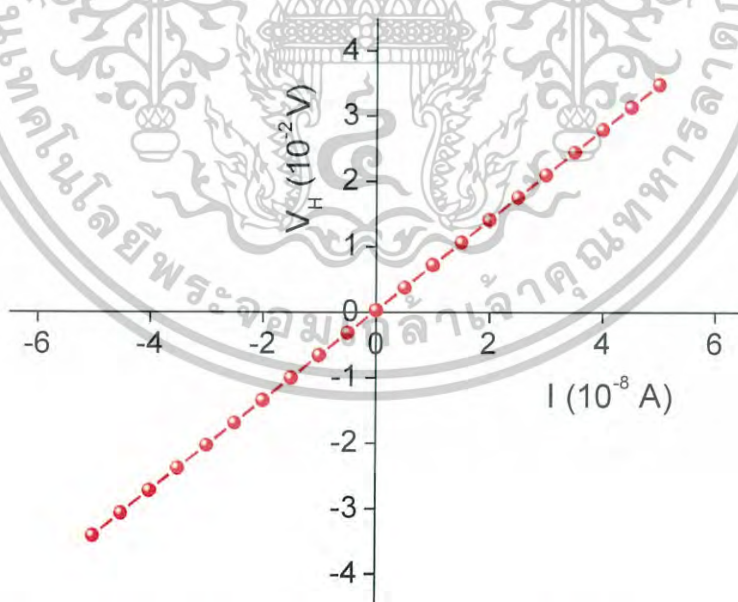
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



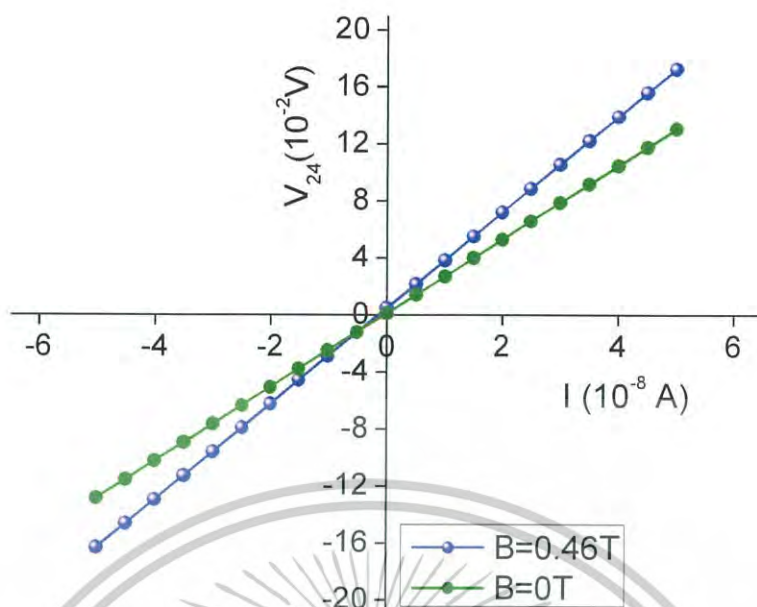
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



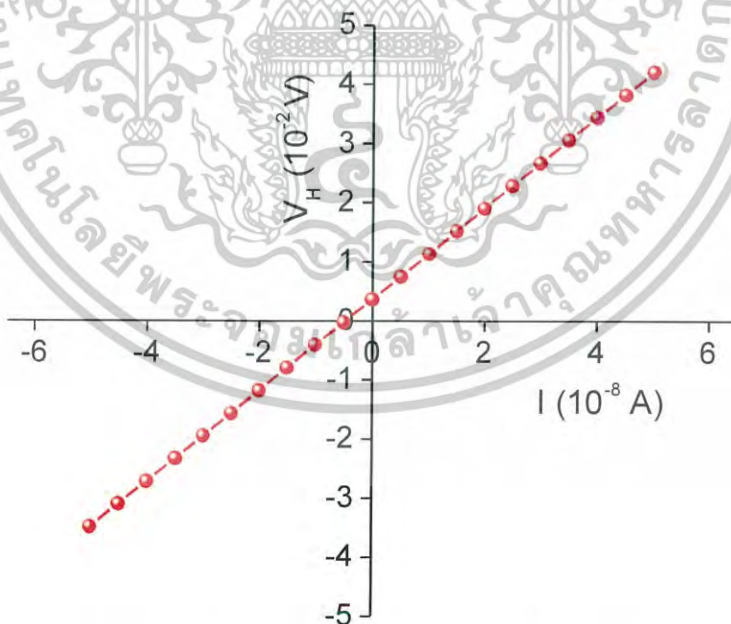
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



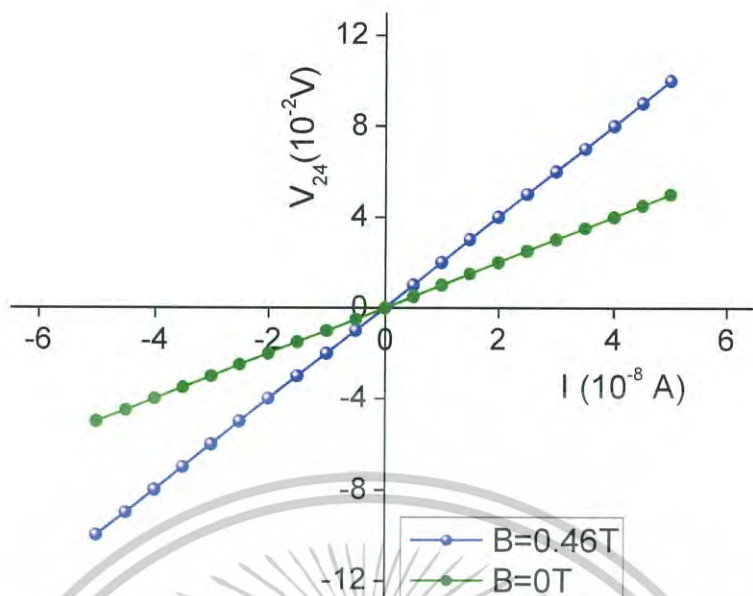
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



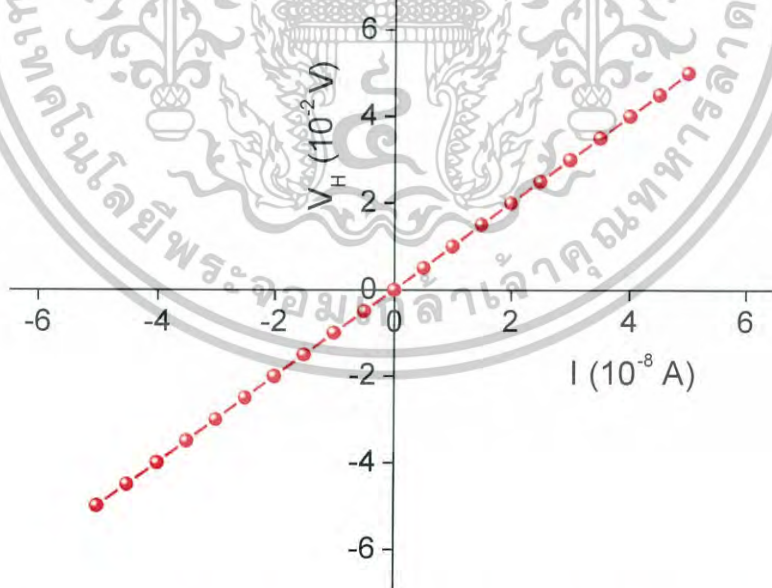
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (4.22)$$

$$\rho = (1.39 \times 10^8)(5 \times 10^{-5}) = 6.95 \times 10^3 \Omega \cdot cm$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$R_H = 10^8 \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (4.23)$$

$$R_H = 10^8 (8 \times 10^{-5}) \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right) = 8.70 \times 10^3 cm^3 / C$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$n = \frac{1}{qR_H} \quad (4.24)$$

$$n = \frac{1}{(1.60 \times 10^{-19})(8.70 \times 10^3)} = 7.18 \times 10^{14} cm^{-3}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวพาหะ ได้ดังนี้

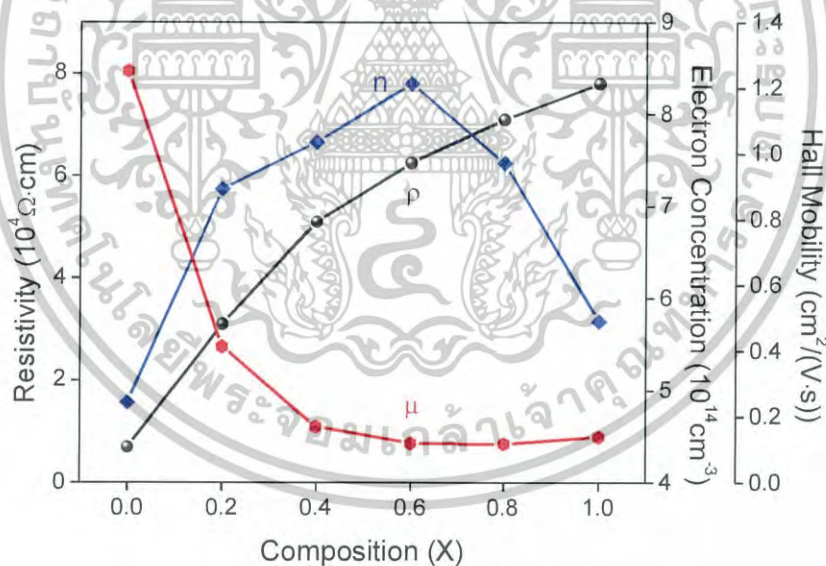
$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (4.25)$$

$$\mu_H = \frac{8.70 \times 10^3}{6.95 \times 10^3} = 1.25 cm^2 / (V \cdot s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^3/C)	Electron Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)
0.0	6.95×10^3	1.28×10^4	4.87×10^{14}	1.25
0.2	3.10×10^4	8.70×10^3	7.19×10^{14}	0.41
0.4	5.10×10^4	8.33×10^3	7.70×10^{14}	0.17
0.6	6.25×10^4	7.50×10^3	8.33×10^{14}	0.12
0.8	7.10×10^4	8.37×10^3	7.47×10^{14}	0.12
1.0	7.80×10^4	1.08×10^4	5.37×10^{14}	0.15



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินการวิจัยของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และ ทาการศึกษาลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มบางและวัดสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าลักษณะของฟิล์มบาง $CdSe$ ($x=0.0$) มีสีส้มเหลือง และเมื่อมีการเพิ่มเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของ $ZnSe$ ลักษณะสีของฟิล์มที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นและเป็นสีดำที่เราเพิ่มปริมาณของ $ZnSe$ 100 เปอร์เซ็นต์ ($x=1.0$) ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นฐานรองรับ ยึดเกาะกันได้ดีไม่มีการหลุดร่อน

5.1.2 ผลของการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนปรากฏอยู่ในช่วง $25.40^\circ - 27.16^\circ$ องศา โดยฟิล์มบางกรณีพิเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($0.0 \leq x \leq 0.4$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เมื่อ ($x = 0.6$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสผสมและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและเฮกซะโกนัล และเมื่อ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำให้ทราบค่าความขรุขระของพื้นผิว และขนาดของเกรนของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ พบว่ากรณีพิเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($x=0.0$) มีค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 4.951 นาโนเมตร และในกรณีพิเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความขรุขระของพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงกรณีพิเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($x=1.0$) พบว่ามีค่าความขรุขระของพื้นผิวเท่ากับ 10.181 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลของการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 650 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารประกอบ ZnSe ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแบบกราฟสมการกำลังสองโดยมีค่าพารามิเตอร์ความโค้งงอ (bowing parameter) เท่ากับ 0.366 และพบว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าส่วนหางของแถบพลังงานที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเราสรุปได้ว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานก็คือข้อบกพร่องของโครงสร้างนั่นเอง

จากการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมขึ้นและหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง โดยการใช้โปรแกรม PARAV 2.0 ซึ่งอาศัยข้อมูลของสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าค่าดัชนีหักเหของแสงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 จนถึง 1.0 และเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากการที่ค่าดัชนีหักเหของแสงน้อยแสงสามารถส่งผ่านฟิล์มได้ดีและการที่ค่าดัชนีหักเหของแสงมากจะทำให้ทิศทางของแสงในฟิล์มบางเปลี่ยนไปมากโอกาสที่แสงจะสูญเสียภายในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะมีสูงขึ้นเนื่องจากระยะทางในการเดินทางของแสงในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น

ส่วนของแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว จากการทดลองสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ (E_0) และ ค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) พบว่าค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ (E_0) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 จนถึง 1.0 และค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน (E_d) เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($x \leq 0.6$) และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($x \geq 0.8$) ส่วนค่าโมเมนต์ที่ลำดับ (M_1) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ (M_2) มีแนวโน้มลดลงเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0 จนถึง 1.0 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของอิเล็กตรอนในอะตอมที่จะไหลไรซ์ตามสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้ามาในผลึก โดยบทบาทของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแบ่งเป็นสองช่วงความยาวคลื่น ซึ่งอธิบายด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้นๆ จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่า จำนวนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานที่ต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน และจำนวนจินตภาพของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น และมีพลังงานที่สูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ Zn จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้

ในการศึกษาถึงค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ พบว่า ค่าสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนจำนวนจริงและส่วนจำนวนจินตภาพ ส่วนจำนวนจริงของสภาพนำแสงเชิงซ้อน จะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้นและมีพลังงานสูงกว่าค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นานมานี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างแถบพลังงาน และส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำแสงเชิงซ้อนจะมีผลในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว และมีพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน

5.1.4 ผลของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ($0 \leq x \leq 1$) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnSe เนื่องจากอะตอมของ Zn มีขนาดเล็ก จึงทำให้ความยาวพันธะระหว่าง Zn-Se สั้นกว่าของกรณี Cd-Se ความยาวพันธะสั้นจะทำให้พันธะมีความแข็งแรงมาก ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูง ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเศษส่วนโดยโมล (x) ที่เพิ่มขึ้น ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น (n-type) ทุกค่าเศษส่วนโดยโมล (x) ของ Zn แต่สภาพคล่องพาหะ (μ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณเศษส่วนโดยโมล (x) มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าสภาพคล่องพาหะแปรผกผันกับสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ซึ่งสอดคล้องกันดีตามความสัมพันธ์ $\rho = 1/n e \mu$ แต่สำหรับกรณี $0 < x < 1$ ซึ่งเป็นอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระมีปริมาณมากกว่ากรณีเฟสเดี่ยวของ CdSe และของ ZnSe แสดงว่าการเติมปริมาณของ Zn เข้าไปในโครงผลึกของ CdSe ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องผลึกชนิดที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสควรระวังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกไม่สม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ติดทั้งแผ่น
2. ต้องทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อ ทำงานเสร็จและก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
3. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับ เพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจ่ายกระแสแก่แผ่นฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องตามที่ต้องการ และจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์ม บางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
4. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควร ระมัดระวังไม่ให้สารกระเด็นออกจากภาชนะใส่สารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. การศึกษาการย่อยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระเหยประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสับเตอริงเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ดุสิต ถ้อยมั่น และ ทิมัมพร จันทร์เพ็ญ. 2558. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- ชนิภรณ์ จุไรสง, ธิรญา โชติธนันท์. 2556. การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO . วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- เอกสฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกการคำนวณว่ากรณีใดที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ใช้

รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมี ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูรัักษ์เกียรติ. 2558. การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีอีทีพีดีซีสปีดเตอร์ริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูรัักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูรัักษ์เกียรติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เมธิรา ร่วมสุข. 2555. “สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Ameri, M. Fodil, M. Aoumeur-Benkabou, F.Z. Mahdjoub, Z. Boufadi, F. and Bentouaf, A. 2012. “Physical Properties of the $Zn_xCd_{1-x}Se$ Alloys: Ab-Initio Method.” *Materials Science and Applications*. 3:768-778.

Ammar, A.H. 2001. “Structural and Optical Properties of $Zn_xCd_{1-x}Se$ Thin Films.” *Physica B*. 296: 312-318.

Ammar, A.H. 2001. “Some Studies on Structural and Optical Properties of $Zn_xCd_{1-x}Se$ Thin Films” *Vacuum*. 60: 355-360.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Arslay, M. Maqsood, A. Mahmood, A. and Iqbal, A. 2013. "Structural and Optical Properties of Copper Enriched ZnSe Thin Films Prepared by Closed Space Sublimation Technique." *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2013: 1797-1803.
- Boyadjiev, S.I. Georgieva, V. Yordanor, R. Raichera, Z. Szilagy, I.M. 2016. "Preparation and Characterization of ALD Deposited AnO Thin Films Studied for Gas Sensors." *Appl. Surf. Sci.* 387: 1230-1235.
- Bhosale, M.A. and Bhanage, B.M. 2016. "A Simple Approach for Sonochemical Synthesis of Cu₂O Nanoparticles with High Catalytic Properties." *Advanced Powder Technology*. 27: 238-244.
- Chate, P.A. Hankare, P.P. and Sathe, D.J. 2010. "N-Type Polycrystalline (CdZn)Se Photoelectrode Synthesis and Its Photoelectrochemical Characterizations." *J. Alloys Compd.* 506: 673-677.
- Chavhan, S.D. Mane, R.S. Lee, W. Senthilarasu, S. and Han, S.H. 2009. "Study on Photoelectrochemical Solar Cells of Nanocrystalline Cd_{0.7}Zn_{0.3}Se- Water Soluble Conjugated Polymer." *Electrochimica Acta*. 54: 3169-3175.
- Chavhan, S.D. Mane, R.S. Ganesh, T. Lee, W. Han, S.H. Senthilarasu, S. and Lee, S.H. 2009. "Structural and Optical Properties of Electrodeposited Cd_{0.7}Zn_{0.3}Se Thin Films: Effect of Annealing." *J. Alloys Compd.* 474: 210-213.
- Camacho, J. Loa, I. Cantarero, A. and Hernandez-Caldero, I. 2002. "Temperature Dependence of Raman Scattering and Luminescence of the Disordered Zn_{0.5}Cd_{0.5}Se Alloy." *Microelectron. J.* 33: 349-353.
- Cullity, B.D. 1956. *Element of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Das, S. Banerjee, S. Dutta, A. and Sinha, T.P. 2015. "Vibrational and Thermal Studies of CdSe Nanorods." *Materials Science in Semiconductor Processing*. 40: 412-417.
- David J. Griffiths. 1999. *Introduction to Electrodynamics*, 3rd ed. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
- Deo, S.R. Singh, A.K. Deshmukh, L. Paliwal, L.J. Singh, R.S. and Adhikari R. 2014. "Structural, Morphological and Optical Studies on Chemically Deposited Nanocrystalline CdZnSe Thin Films." *Journal of Saudi Chemical Society*. 18: 327-339.
- 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
- Ghosh, B. Ghosh, D. Hussain, S. Bhar, R. and Pal, A.K. 2012. "Growth of ZnTe Films by Pulsed Laser Deposition Technique." *J. Alloys Compd.* 541: 104-110.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gnatenko, Y.P. Bukivskij, P.M. Faryna, I.O. Opanasyuk, A.S. and Ivashchenko, M.M. 2014. "Photoluminescence of High Optical Quality CdSe Thin Films Deposited by Close-Spaced Vacuum Sublimation." *J. Lumin.* 146: 174-177.
- 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.
- Gul, G. Zakria, M. Khan, T.M. Mahmood, A. and Iqbal, A. 2014. "Effect of Cu Incorporation on Physical Properties of ZnTe Thin Films Deposited by Thermal Evaporation." *Materials Science in Semiconductor Processing.* 19: 17-23.
- Habibi, M.H. and Rahmati, M.H. 2014. "Fabrication and Characterization of ZnO/CdSe-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 Biomolecular Spectroscopy.* 133: 13-18.
- Huang, J.D. Liu, J.Y. and Han, K.L. 2012. "Hybrid Functional Studies of Structural and Electronic Properties of $Zn_xCd_{1-x}S$ and $(Zn_xCd_{1-x})(Se_xS_{1-x})$ Solid Solution Photocatalysts." *International Journal of Hydrogen Energy.* 37:17870-17881.
- Huang, Y. Liu, Y. and Zuo S. 2015. "Preparation and Multicolored Fluorescent Properties of CdTe Quantum Dots/Polymethylmethacrylate Composite Films." *J. Alloys Compd.* 647: 578-584.
- 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.
- Ivashchenko, M.M. Buryk, I.P. Opanasyuk, A.S. Nam, D. Cheony, H. Vaziev, J.G. and Bibyk, V.V. 2015. "Influence of Deposition Conditions on Morphological, Structural, Optical and Electro-Physical Properties of ZnSe Films Obtained by Close-Spaced Vacuum Sublimation." *Materials Science in Semiconductor Processing.* 36: 13-19.
- Ivashchenko, M.M. Opanasyuk, A.S. Perekrestov, V.I., Kosyak, V.V. Gnatenko, Y.P. and Kolomiets, V.M. 2015. "Morphological Structure, Compositional, Properties and IR-Spectroscopy of CdSe Films Deposited by Close-Spaced Vacuum Sublimation." *Vacuum.* 119: 81-87.
- Jackson, J. D. 1999. **Classical Electrodynamics**, John Wiley & Son. Inc.
- Jiang, F. Shen, H. and Wang, W. 2012. "Optical and Electrical Properties of Cu_2ZnSnS_4 Film Prepared by Sulfurization Method." *J. Elec. Mater.* 41(8): 2204-2209.
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Kittel, C. 1971. **Introduction of Solid State Physics**. 4th ed. New York: Jon Wiley & Sons

- Kittel, C. 2005. **Introduction to Solid State Physics**, 8th ed. United States of America: John Wiley & Son, Inc.
- Liangmin Cai, Linjun Wang, Jian Huang, Beiling Yao, Ke Tang, Jijun Zhang, Kaifeng Qin, Jiahua Min and Yiben Xia. 2012. "Preparation of Polycrystalline CdZnTe Thick Film Schottky Diode for Ultraviolet Detectors." *Vacuum*. 88(2013): 28-31
- Mahawela, P. Jeedigunta, S. Ferekides, C.S. and Morel, D.L. 2003. "Analysis of Carrier Transport Phenomena in High Band Gap II-VI -Based MIS Photovoltaic Devices." *Thin Solid Films*. 431-432: 461-464.
- Mahawela, P. Jeedigunta, S. Vakkalanka, S. Ferekides, C.S. and Morel, D.L. 2005. "Transparent High Performance CdSe Thin Films Solar Cells" *Thin Solid Films*. 480-481: 466-470.
- Mezrag, F. Mohamed, W. K. and Bouarissa, N. 2010. "The Effect of Zinc Concentration upon Optical and Properties of Cd_{1-x}Zn_xSe" *Physica B*. 405: 2272-2276.
- Mukherjee, A. B. Satpati, S.R. Bhattacharyya, R. Ghosh, P. Mitra. 2014. "Synthesis of nanocrystalline 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.
- Ramrakhiani, M. 1995. "Zinc Doped Polycrystalline CdSe Films for Solar Energy Conversion." *Mater. Sci. Eng. B*. 35: 493-496.
- Rao, D.R. and Islam, R. 1993. "Structural and Optical Properties of Electron Beam Deposited Zn_{1-x}Cd_xSe Thin Films." *Thin Solid Films*. 224: 195-199.
- Richard, A.P. and Edwards, D.D. 2004. "Sub Solidus Phase Relation and Crystal Structures of the Mixed - Phases in the In₂O₃WO₃ 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
- Spalatu, N. Serban, D. and Potlog, T. 2011. "ZnSe Films Prepared by the Close-Spaced Sublimation and Their Influence on ZnSe/CdTe Solar Cell Performance." **International Semiconductor Conference**. 451-454. In Sinaia, Romania, pp.
- Studenikin, S.A. Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution." *J. Appl. Phys.* 83(4): 2104-2111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Suthagar, J. Rajesh, S. Perumal, K. Balasubramaniam, T. and Suthan Kissinger, N.J. 2010. "Growth and Characterization of Wide-Gap $Cd_{1-x}Zn_xSe$ Ternary Alloys by Using Electron Beam Evaporation Technique." *Acta Physica Polonica A*. 117(3): 506-511.
- Sutrave, S. Shahane, S. Patil, V.B. and Deshmukh, L.P. 1999. "Chemically Prepared $Cd_{1-x}Zn_xSe$ Thin Films: A Correlation Between Compositional and Structural Analysis." *Indian Journal of Pure & Applied Physics*. 37: 384-394.
- Swanepoel. R. 1983. "Determination on the Thickness and Optical Properties of Amorphous Silicon." *J. Phys. E:Sci. Instrum*. 16: 1214-1222.
- 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.
- Velumani, S. Narayandass, S.K. Mangalaraj, D. Sebastian, P.J. and Mathew, X. 2004. "Dielectric and Conduction Studies on Hot-Wall Deposited CdSe Films." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 81: 323-338.
- Wemple, S.H. and DiDomenico, M. 1971. "Behavior of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials." *Phys. Rev. B*. 3(4): 1338-1351.
- Wemple, S.H. 1973. "Refractive Index Behavior of Amorphous Semiconductors and Glasses." *Phys. Rev. B*. 7(8): 3767-3777.
- Wen, H.C. Yang, C.S. and Chou, W.C. 2010. "Effect of Microstructure on the Nanomechanical Properties of $Zn_{1-x}Cd_xSe$ Alloys." *Appl. Surf. Sci*. 256: 2128-2131.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.77-2307

Pattern : 77-2307		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd Se		2θ	I	h	k	l
Cadmium Selenide		23.882	100	1	0	0
		25.391	59	0	0	2
		27.097	76	1	0	1
		35.136	34	1	0	2
		41.999	72	1	1	0
		45.810	68	1	0	3
		48.888	11	2	0	0
		49.718	42	1	1	2
		50.699	10	2	0	1
		52.150	1	0	0	4
		55.879	7	2	0	2
		58.130	1	1	0	4
		63.884	19	2	0	3
		66.375	13	2	1	0
		67.880	7	2	1	1
		68.099	1	1	1	4
		71.902	13	1	0	5
		72.295	5	2	1	2
		74.268	<1	2	0	4
		76.735	7	3	0	0
		79.435	17	2	1	3
		82.365	6	3	0	2
		82.496	2	0	0	6
		86.916	5	2	0	5
		87.422	1	1	0	6
		88.181	<1	2	1	4
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 191.37				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 112.20				
a = 4.29900		Dx = 5.665				
c = 7.01000		Z = 2				
		I/Cor = 5.78				
ICSD COLLECTION CODE 050630						
REMARKS FROM ICSD . REM F Determination based on model III of Fakineos Stevenso						
REMARKS FROM ICSD . REM Barnea Aust J. Phys. 1982,35 415-424						
TEST FROM ICSD : At least one IT missing						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference						
*Acta Crystallogr. Sec. B Structural Science, volume 40, page 530, (1984) Stevenso, A.W. Barnea Z						
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

