

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ชนิดพี

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF p-TYPE

SEMICONDUCTOR CuAlO_2



ประธาน ประจวบโชค

PRATHAN PRACHOPCHOK

ฉพ.
๒/๒๕๖๓
๒๐๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74516
วัน,เดือน,ปี..... - 2 ต.ค. 2550

b. 118 2528๗
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF p-TYPE
SEMICONDUCTOR CuAlO_2**



PRATHAN PRACHOPCHOK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ชนิดพี
นักศึกษา	นายประธาน ประจวบโชค
รหัสประจำตัว	47064107
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่มีความบริสุทธิ์ โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นให้ละเอียดและคลุกเคล้ากันดี จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปโดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องไฮโดรลิกความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง ผลึกที่อัดเป็นเม็ดแล้วจะเอาไปเผาในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนฟิล์มหนาของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ได้จากการเคลือบสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ลงบนกระจกสไลด์ โดยวิธีพิมพ์สกรีน โดยที่ผลึกผงจะละลายในเอททิลีนไกลคอล แล้วจากนั้นจึงพิมพ์สกรีนลงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง การแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะช่วยทำให้เนื้อฟิล์มแน่นขึ้น ส่วนฟิล์มบางของ CuAlO_2 เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เคลือบบนกระจกสไลด์ที่ความดัน 35×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยใช้ผลึกผง CuAlO_2 เป็นสารตั้งต้นจากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้ไปแอนนัลในอากาศความดันปกติและในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของผลึกพหุพันธ์และฟิล์มหนา $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ส่วนภาพถ่ายของผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างทั้งสามแบบได้จากการบันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuAlO_2 คำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกพหุพันธ์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ และความต้านทานแผ่น $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ของฟิล์มหนา และฟิล์มบาง CuAlO_2 นี้ค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้โดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ จากค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้สามารถระบุได้ว่าชนิดการนำไฟฟ้าแบบพีของผลึกพหุพันธ์และฟิล์มหนา $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ฟิล์มบาง CuAlO_2 มีสาเหตุมาจาก แวแคนซีของอะตอมโลหะและอะตอมออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในโครงสร้างผลึก รวมทั้งได้มีการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า-ความร้อนด้วย โดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย

Thesis Title	Preparation and Characterization of p-type Semiconductor CuAlO ₂
Student	Mr. Prathan Prachopchok
Student ID	47064107
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this thesis, polycrystalline of CuAl_{1-x}Mg_xO₂ ($0 \leq x \leq 0.25$) were prepared by a solid state reaction method. The mixture of high purity of CuO, Al₂O₃ and Mg(NO₃)₂.6H₂O powder was ground and then pressed by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at 1100 °C for 24 h. Thick films of CuAl_{1-x}Mg_xO₂ ($0 \leq x \leq 0.25$) were deposited on slide glass substrate by screen printing method and using CuAl_{1-x}Mg_xO₂ phase in powder form as a precursor. The powder were dispersed in ethylene glycol and immediately depositing the screen on the glass substrate. In order to obtain the higher dense material, the as-deposited thick films were annealed in air at 100 °C for 30 min. CuAlO₂ thin film were prepared by thermal evaporation method using single phase of CuAlO₂ obtained by solid state reaction method. The films were deposited on slide glass substrate in vacuum of 3.5×10^{-5} mbar. The as-deposited thin films were annealed in air and N₂ atmosphere during 100–500 °C for 1 h. The crystal structure of polycrystalline and thick films of CuAl_{1-x}Mg_xO₂, thin films of CuAlO₂ was checked by X-ray diffraction method. Surface morphology of the three kinds of samples was observed by scanning electron microscope (SEM) the energy gap value of CuAlO₂ thin films was determined from the optical transmission spectra. Electrical resistivity and sheet resistance were performed on the polycrystalline and thick films of CuAl_{1-x}Mg_xO₂ and on thin films of CuAlO₂ respectively. The activation energy value of the three kind of samples were estimated by the resistance measurements as a function of temperature. From the activation energy values, the origin p-type conduction in polycrystalline and thick films of CuAl_{1-x}Mg_xO₂ and in thin films of CuAlO₂ was attributed to metal deficit and excess oxygen atoms within the crystallite sites of the material. The variation of Seebeck coefficient as a function of temperature was also investigated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภู่วัฒนเกียรติ และ อาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสูตร ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจวบใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิจิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และชุดวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์ และเครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ คุณวีรชัย ลิภา คุณสุกฤษฎี เกิดแสง คุณอุปถัมภ์ นาครักษ์ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณจิตติกร จรรยาธรรม คุณอดุลย์ หาญวังม่วง คุณพิรพร สิริพทุไชรธรรม คุณจุฑามาศ วัฒนานุกรักษ์ คุณณัฐวัฒน์ ทุมเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องสาว และญาติทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุน และส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่ดีเสมอมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	II
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก.....	6
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	6
2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก.....	9
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ.....	11
2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	11
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาลเออร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์.....	12
2.1.3.3 โครงสร้างผลึกแบบดีลาฟอสไฟท์.....	13
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก.....	14
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด.....	15
2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น.....	15
2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ.....	17
2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	17
2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	22
2.2.2 การส่งผ่านแสง.....	26
2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	28
2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	28
2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	30
2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	30
2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก.....	31
2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนซิก.....	32
2.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์.....	37
2.3.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	38
2.3.4 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	40
2.3.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	41
2.3.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์.....	46
2.4 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	48
2.4.1 ปรากฏการณ์ซีเบก.....	49
2.4.2 ปรากฏการณ์เปลติเยร์.....	52
2.4.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน.....	54
2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	55
2.5.1 อัตราการระเหยสาร.....	56
2.5.2 ความดันไอของธาตุ.....	56
2.5.3 การระเหยสารประกอบ.....	58
2.5.4 อิทธิพลของ โครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการระเหยสาร.....	59
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	61

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 การเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดย วิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	60
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	60
3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	61
3.1.3 วิธีการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	63
3.2 การเตรียมสารกึ่งตัวนำเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	64
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	64
3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีน.....	64
3.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสาร ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	64
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2	65
3.3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CuAlO_2 โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	65
3.4 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ทั้งในรูปแบบที่เป็น เซรามิก ฟิล์มหนา ฟิล์มบาง.....	66
3.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	66
3.4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	66
3.4.3 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	66
3.4.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	66
3.4.5 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	66
3.4.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์.....	67

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.7 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก.....	67
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	70
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	70
4.1.1 เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	70
4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	71
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก.....	74
4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	73
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	79
4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	80
4.2.1 ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	80
4.2.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	81
4.2.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	82

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลองการศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	84
4.3.1 ผลการทดลองของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้ จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์.....	84
4.3.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้จากการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	85
4.3.3 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้ จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์.....	86
4.3.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบน ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	87
4.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuAlO ₂	92
4.3.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของฟิล์มบาง CuAlO ₂	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุปผลการวิจัยของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAl _{1-x} Mg _x O ₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	99
5.2 สรุปผลการวิจัยของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ CuAl _{1-x} Mg _x O ₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	102
5.3 สรุปผลการวิจัยของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ₂ ที่เตรียมได้จากการ ระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	102
ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	105

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	117



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	7
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ.....	8
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z).....	10
2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	21
2.5 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ.....	58
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$).....	63
4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	72
4.2 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก.....	75
4.3 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และสภาพคล่องพาหะของเซรามิกของสารประกอบ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก.....	76
4.4 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....	78
4.5 แสดงค่าความต้านแผ่นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	82
4.6 แสดงพลังงานกระตุ้นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	83

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (E_{g1}) และแบบเฉียง (E_{g2}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	90
4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (E_{g1}) และแบบเฉียง (E_{g2}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	90
4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงที่ขึ้นกับระยะเวลาในการระเหยของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยแตกต่างกัน.....	92
4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่น (หน่วยเป็น $10^9 \Omega/\text{sq}$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยใช้เวลาในการระเหยนาน 20, 30 และ 40 นาที เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศและในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	93
4.11 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (หน่วยเป็น meV) ของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศใช้เวลาในการระเหยนาน 20, 30 และ 40 นาที และแอนนیلในอากาศและ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	95
4.12 แสดงชนิดของระดับพลังงานและสาเหตุของข้อบกพร่องผลึกในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ..... 6
2.2	การบอกระนาบต่างๆของผลึก.....10
2.3	โครงสร้างผลึกแบบเพชร..... 11
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์..... 12
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์
ก	โครงสร้างชนิดรอมโบฮีดรัล 2H.....13
ข	โครงสร้าง ชนิดเฮกซะ โกนัล 2H..... 13
2.6	แสดงแผนภูมิคาร์ซีมีไอออนของโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ของ สารประกอบชนิดต่างๆ..... 14
2.7	แสดงข้อบกพร่องผลึก..... 16
2.8	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ..... 16
2.9	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู..... 16
2.10	แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน..... 17
2.11	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตาม กฎของแบรกก์..... 18
2.12	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD..... 19
2.13	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์..... 20
2.14	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 22
2.15	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ
ก	ฉนวน.....23
ข	สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์..... 23
ค	สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... 23
ง	สารกึ่งตัวนำชนิดพี..... 23
จ	โลหะ..... 23
ฉ	สารกึ่งโลหะ..... 23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)	
ก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง.....	25
ข ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง.....	25
2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)	
ก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง.....	25
ข ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน.....	25
2.18 แสดงโครงสร้างออร์บิทัลของ CuAlO_2	26
2.19 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง.....	27
2.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน.....	29
2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	34
2.22 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่าง.....	37
2.23 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	37
2.24 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	39
2.25 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	40
2.26 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง.....	41
ข กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า.....	41
2.27 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	
ก ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x	42
ข หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x	42
2.28 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ.....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d.\Delta R_{\text{MNOF}}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B.....	48
2.30 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน	
ก วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน.....	50
ข วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	50
ค แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยังไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิ.....	50
ง แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	50
2.31 ปรากฏการณ์เปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ก. หลักการวัดปรากฏการณ์เปลติเยร์.....	53
ข. วงจรเปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิด n.....	53
ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแสไฟฟ้า J ไหล.....	53
2.32 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบก สภาพนำไฟฟ้า และปริมาตรพาหะ.....	55
2.33 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว.....	57
2.34 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว.....	57
2.35 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น.....	59
3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์.....	68
3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....	68
3.3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทาน ไฟฟ้า.....	69
3.4 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	69
4.1 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสาร CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่บดรวมกัน และนำไปอัดเป็นเม็ดผลึก.....	70
4.2 แสดงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก.....	71
4.3 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก.....	7.1

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก..... 73
4.5	แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก..... 74
4.6	แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าไฟฟ้า สภาพคล่องของโฮล และความหนาแน่นของโฮลของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก.....76
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก..... 77
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก..... 79
4.9	แสดงภาพฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีพิมพ์สกรีนบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์..... 80
4.10	แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์..... 81
4.11	แสดงค่าความต้านทานแผ่นเมื่อเทียบกับสัดส่วนของอะตอม Mg ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....82
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์..... 83
4.13	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ใช้เวลาในการระเหยต่างกันและเมื่อมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ใช้เวลาในการระเหยต่างกันและเมื่อมีการแอนนیلในบรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 85
4.15	แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียม ได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 80 นาที..... 85
4.16	แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 40 นาที และเมื่อมีการแอนนیلในอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 86
4.17	แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 87
4.18	แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลในบรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 87
4.19	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงจากรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อ ไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	
แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	89
4.21	
แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยต่างกัน.....	91
4.22	
แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงเทียบกับระยะเวลาในการระเหยสารของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยแตกต่างกัน.....	91
4.23	
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลในอากาศและบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	92
4.24	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาในการระเหยสารนาน 20 นาที และมีการแอนนิลในอากาศที่อุณหภูมิ $100\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$	94
4.25	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาในการระเหยสารนาน 20 นาที และมีการแอนนิลในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ $100\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$	94

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของฟิล์มบางของสาร
กึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่ เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนใน
ระบบสุญญากาศโดยใช้ระยะเวลาในการระเหย 80 นาที ที่ไม่มีการ
แอนนีลและมีการแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ $100\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา
1 ชั่วโมง..... 97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การพัฒนาเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (optoelectronics) แนวใหม่ที่เรียกว่า สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิด โปร่งแสง (transparent electronics) หรือสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ล่องหน (invisible electronics) เริ่มได้รับความสนใจในการพัฒนากันอย่างกว้างขวาง [1-3, 45] โดย สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวนี้ จะต้องมีชั้นหน้าต่างเป็นแบบหน้าต่างฟังก์ชัน (functional window) ซึ่ง จะต้องมีความโปร่งแสงในย่านตามองเห็น แต่สามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูงและต้องมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้งชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type) [1] ดังนั้นสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้จะสามารถปกป้องรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ รวมทั้งสามารถผลิต พลังงานไฟฟ้าออกมาได้หลังจากที่ดูดกลืนคลื่นแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตไว้

อุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ZnO, SnO₂ และ In₂O₃ ที่ เจือด้วยอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งชนิดการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบเอ็น และยากที่จะ ประดิษฐ์ให้เป็นชนิดพี เมื่อไม่นานมานี้ คาวาซุเอะ (Kawasoe) และเพื่อนร่วมงาน [4] ได้รายงาน ว่าสามารถประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO₂ ชนิดพีโดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (pulse laser deposition : PLD) หลังจากนั้นงานวิจัยฟิล์มบางของอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพีที่เป็น สารประกอบออกไซด์ก็ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นสารประกอบในกลุ่มเคลลา ฟอสไซท์ (delafossite) และกลุ่มอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กลุ่มเคลลาฟอสไซท์ [3] ได้มีการประดิษฐ์เป็นรอยต่อ p-i-n และหัวต่อ p-n ทั้งในแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterojunction) ซึ่งพบว่ามีสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงแบบต่าง ๆ เช่น จอแสดงผลแบบจอแบนชนิดไดโอดเปล่งแสง และเซลล์ แสงอาทิตย์ เป็นต้น [3]

CuAlO₂ เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งในกลุ่มเคลลาฟอสไซท์ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน เป็นทั้งแบบตรงและแบบเฉียงที่มีค่าเท่ากับ 3.5 และ 1.8 eV ตามลำดับ [4] โครงผลึกมี 2 แบบ คือ 2H (เฮกซะโกนัล) และ 3R (รอมโบฮีดรัล) ซึ่งมีสเปกตรัม P6₃ / mmc และ R3m ตามลำดับ [5] ความแตกต่างของ โครงผลึกทั้ง 2 แบบ คือมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมของชั้นออกไซด์ AIO₂ ที่ต่างกัน กล่าวคือ โครงผลึก 2H จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมของชั้นออกไซด์ AIO₂ เป็นแบบ AaBbAaBb ส่วน โครงผลึก 3R จะเป็นแบบ AaBbCcAaBbCc [5] พันธะโควาเลนต์ของ ผลึก CuAlO₂ เกิดจาก p-d ไฮบริดเซชันของออร์บิทัล Cu-3d กับ O-2p_z ของคัมเบล O-Cu-O [1,4]

สถานะของพันธะเป็นได้ 3 แบบ โดยแบบที่ 1 คือ แอนติ-บอนดิง (anti-bonding) $3d(3z^2-r^2)$, $3d(yz)$, $3d(zx)$ แบบที่ 2 คือ นอน-บอนดิง (non-bonding) $3d(x^2-y^2)$, $3d(xy)$ และแบบที่ 3 คือ บอนดิง (bonding) $3d(3z^2-r^2)$, $3d(yz)$, $3d(zx)$ [1] ซึ่งส่งผลให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (bandwidth) มีค่าประมาณ 4 eV ส่วนช่องว่างของแถบพลังงานของชั้นออกตะฮีดรอล AlO_2 มีค่าประมาณ 6 eV ดังนั้นสถานะพลังงานของคัมเบล O-Cu-O จะแทรกอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของชั้นออกตะฮีดรอล AlO_2 [1]

ผงผลึกของสารประกอบ CuAlO_2 เตรียมได้จากวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid state reaction) โดยการบดสารตั้งต้น CuO กับ Al_2O_3 แล้วอัดให้เป็นเม็ด (pellet) จากนั้นจึงนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง [6] สภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิก CuAlO_2 มีค่าประมาณ 1 $\Omega\cdot\text{cm}$ [5] ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี เนื่องจากมาจากแวนแคนซีของอะตอม Cu และ/หรือ อินเตอร์สติเชียลของอะตอมออกซิเจน (oxygen interstitial) [7] สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) ที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าสูงประมาณ 500 $\mu\text{V}/\text{K}$ [4] ดังนั้น สารประกอบ CuAlO_2 จึงมีปรากฏการณ์เชิงไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric effect) ที่โดดเด่นอีกชนิดหนึ่งของกลุ่มเคลาฟอสไซท์ [8]

ฟิล์มบางของ CuAlO_2 เตรียมได้จากหลายวิธี เช่น การเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (PLD) [3] การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีสปัตเตอร์ริง (dc sputtering) [8,9] และพัลส์แมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง (pulse magnetron sputtering) [9] นอกจากนี้ฟิล์มบางยังสามารถเตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี เช่นการจุ่มเคลือบในสารละลายที่เป็น โซล-เจล (sol-gel) [11,12] จากสารตั้งต้นที่เป็นคอปเปอร์อะซิเตตไฮเดรต (copper acetate hydrate) เอทานอล (ethanol) 2-เมทอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol) บุตานอล (butanol) และอลูมิเนียมไตรเซกบิวทอกไซด์ (aluminium-trisec-butoxide) [11] และจากกรดอะซิติก (acetic acid) คอปเปอร์เอโทไซด์ (copper ethoxide) อลูมิเนียม-คอปเปอร์ ดับเบิล-เมทัล อัลค็อกไซด์ (aluminium copper double-metal alkoxide) และโพลีออกซีเอทิลีน (poly oxyethylene) [9] อ็อกทิลฟีนิลอีเทอร์ (octylphenylether) [12] ฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีเคลือบฟิล์มบางด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (PLD) มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี ความหนาแน่นของโฮลมีค่าประมาณ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ สภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 11 $\Omega\cdot\text{cm}$ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงประมาณ 80 % [1,12] ส่วนฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากวิธีเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีสปัตเตอร์ริง [7] ก็ให้ผลในทำนองเดียวกัน กล่าวคือความหนาแน่นของโฮลมีค่าประมาณ $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ สภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้องมีค่าสูงประมาณ 230 $\mu\text{V}/\text{K}$ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

คาทายามา-โยชิเดะ (Katayama-Yoshida) [12] เสนอว่า CuAlO_2 สามารถที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงได้ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจจะเตรียมสารประกอบ CuAlO_2 ทั้งในรูปของเซรามิกและฟิล์มหนานในราว 2-3 ไมโครเมตร เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้น

ดูดกลืนแสง (absorber) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS / p-CuAlO₂ ซึ่งปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ n-CdS / p-CdTe และ n-CdS / p-Cu(In, Ga)Se₂ กันอย่างกว้างขวาง โดยที่ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ในระดับ 15 และ 17.8 % ตามลำดับ [13, 14] ซึ่งทั้ง CdTe และ CuInSe₂ และ CuGaSe₂ ต่างเป็นวัสดุมีราคาแพง แต่ถ้าใช้ CuAlO₂ แทน CuInSe₂ และ CdTe ได้ จะทำให้ต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้ในอนาคตการเตรียมฟิล์มหนาด้วยวิธีพิมพ์สกรีน (screen printing method) ก็ได้รับความนิยมในการประดิษฐ์ฟิล์มหนาของสารประกอบออกไซด์หลายชนิด [15,16] ที่มีคุณภาพดีมีเกรนขนาดใหญ่ยึดติดกับฐานรองได้ดีไม่มีรอยแตกในเนื้อฟิล์มและมีสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติการส่งผ่านแสงที่ดีดังนั้น ในเบื้องต้นทางกลุ่มวิจัยจึงเลือกวิธีพิมพ์สกรีนนี้ในการประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO₂ บนกระจกสไลด์เพื่อประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อวิวิธพันธุ์ของ n-CdS / p-CuAlO₂ ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.2.2 ทำการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) เคลือบบนกระจกสไลด์ โดยวิธีพิมพ์สกรีน (screen printing) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ผงผลึก CuAl_{1-x}Mg_xO₂ เป็นสารตั้งต้น
- 1.2.3 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO₂ ที่ไม่มีสารเจือโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้ผงผลึก CuAlO₂ ที่ไม่มีสารเจือเป็นสารตั้งต้น
- 1.2.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารตัวอย่างทั้งสามชนิด คือ เซรามิก ฟิล์มหนา และฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.5 ศึกษาผิวหน้าผลึกเชิงมหภาคของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) และฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.6 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuAlO₂
- 1.2.7 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) และวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มหนา CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO₂ ที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งทำการวัดความต้านไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ (ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง) เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงานของข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน

- 1.2.8 วัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่างทั้งชนิดที่เป็นเซรามิกและฟิล์มบาง
- 1.2.9 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารตัวอย่างที่เป็นแบบเซรามิก เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะและปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารตั้งต้น CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.3.2 ทำการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีพิมพ์สกรีน ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ผงผลึก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ละลายในเอททิลีนไกลโกลแล้วทำการพิมพ์สกรีนลงบนกระจกสไลด์แล้วเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที
- 1.3.3 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่ไม่มีสารเจือ โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้ผงผลึก CuAlO_2 ที่บริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นและทำการเคลือบด้วยเวลา 10, 20, 30, 40 และ 80 นาที ตามลำดับเพื่อให้มีความหนาต่างกัน
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด คือ เซรามิก ฟิล์มหนา ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) และฟิล์มบาง CuAlO_2 ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.3.5 ศึกษาผิวหน้าเชิงมหภาคของสารตัวอย่างเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) และ ฟิล์มบาง CuAlO_2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและหาค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuAlO_2 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.3.7 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) และวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มหนาและฟิล์มบาง รวมทั้งทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานของข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.8 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อน โดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่างทั้งชนิดที่เป็นเซรามิกและฟิล์มบาง
- 1.3.9 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารตัวอย่างเซรามิกเพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะและปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของ CuAlO_2 โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของ CuAlO_2
- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ เช่น โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงไฟฟ้า และสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อนของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ทั้งชนิดเซรามิก ฟิล์มหนา และฟิล์มบาง
- 1.4.5 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของ Mg ที่มีต่อสมบัติของเซรามิกของ CuAlO_2
- 1.4.6 ทำให้ได้ข้อมูลทางการเตรียมและสมบัติพื้นฐานที่สำคัญบางประการของฟิล์มบาง CuAlO_2 เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง n-CdS/p-CuAlO₂ ในอนาคต

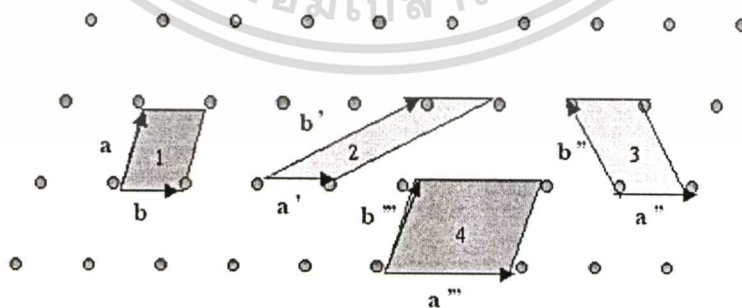
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [17-24]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบ แบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะ ได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงสร้างผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงสร้างผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้าง ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

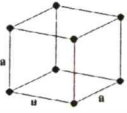
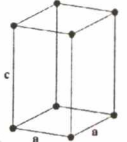
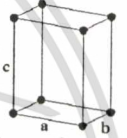
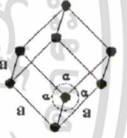
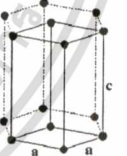
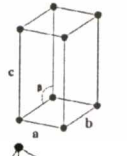
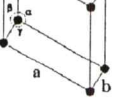
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	มุม
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60° (60° rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มี ข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ a , b และ c และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก [17-24]

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

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

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

3. การระบุระนาบจะใช้อักษร $(h\ k\ l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

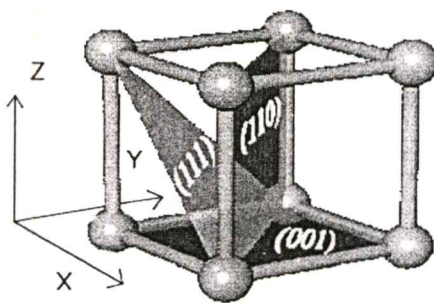
ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ ($-$) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ ($\bar{-}$) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

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

ดังแสดงในรูปที่ (2.2) และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนอลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hkil) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ(110) จะเรียกว่า ($1\bar{1}20$) ในระบบเฮกซะโกนัล

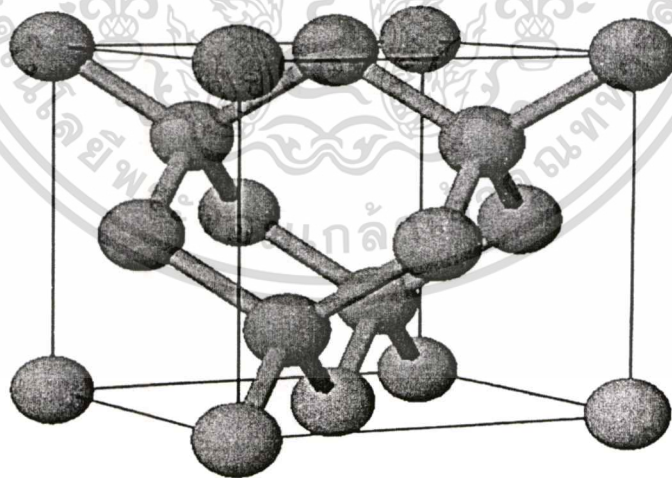
- เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ

โครงสร้างผลึกแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติต่างๆ ไม่เหมือนกัน เช่น สมบัติทางแสง ช่องว่างแถบพลังงาน สมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) [17-23]

โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ α -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่า โครงสร้างแบบเพชรนี้เกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของเส้นทแยงมุม หนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอิเล็กทรอนิกส์เท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่ง (000) , $(0\frac{1}{2}\frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}0\frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}0)$, $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4})$ ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดคู่ออมบ์ซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทุกทาง นอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้

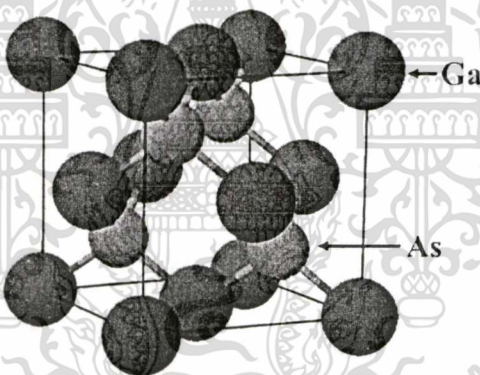


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure) [17-23]

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และ II-VI เช่น GaAs, GaSb, InSb เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร ได้จากการเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก 2 โครง ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ มาซ้อนเหลื่อมกันแต่ต่างกันตรงที่แต่ละโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกที่วางซ้อนเหลื่อมกันนั้นเป็นอะตอมของธาตุแต่ละชนิดกัน ดังรูปที่ 2.4

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วยอะตอมต่างชนิดกัน 2 ชนิดซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมแต่ละชนิดต่างกัน แต่อะตอมที่ปลายแขนของพันธะสี่หน้าของอะตอมแต่ละตัวยังคงเป็นอะตอมชนิดเดียวกันดังนั้นความยาวพันธะของแต่ละอะตอมจึงเท่ากัน โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงยังเป็น รูปคิวบิก แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชร ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs



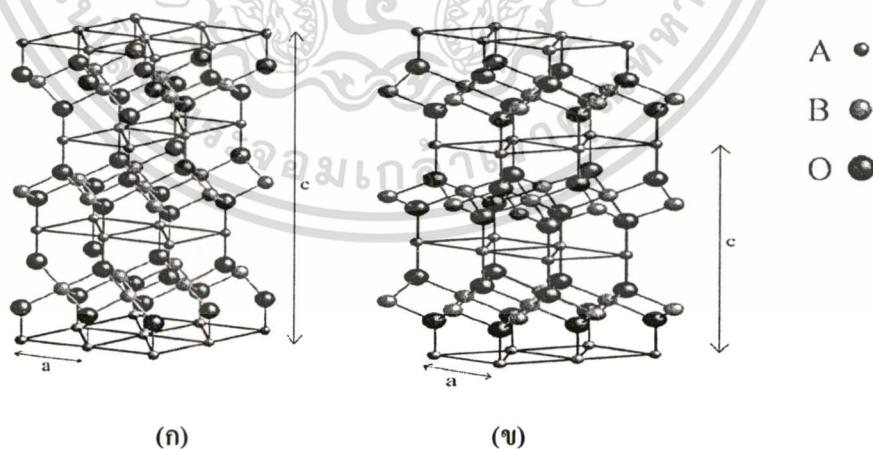
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โดยที่อะตอมของ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0,0), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ อะตอมของ As อยู่ที่ตำแหน่ง $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}), (\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4})$ ปลายแขนของ Ga จะมีอะตอมของ As จับอยู่ 4 อะตอม และปลายแขน As จะมีอะตอม Ga จับอยู่ 4 อะตอมเช่นเดียวกัน

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V จะยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่ในกรณีนี้อะตอมของธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่ม III (หรือกลุ่ม V) ที่เราแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสม (เช่น Ga และ In ในโลหะผสม $Ga_xIn_{1-x}As$) จะเรียงตัวอย่างสุ่ม (random) อยู่ในโครงผลึกย่อยเฟซเซนเตอร์คิวบิก ของธาตุกลุ่ม III

2.1.3.3 โครงสร้างผลึกแบบเดลฟาอไซต์ (dealfossite structure) [25]

สารประกอบเดลฟาอไซต์จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบออกไซด์เชิงสาม โดยมีสูตรโมเลกุลคือ ABO_2 โดยที่ A เป็นอะตอมที่มีประจุ +1 เช่น ทองแดง (Cu), เงิน (Ag) หรือ พาราเดียม (Pd) เป็นต้น ซึ่งจะมีพันธะยึดเหนี่ยวกับอะตอมของออกซิเจนสองอะตอมในแบบเชิงเส้น (linear) โดยที่ระยะทางระหว่างอะตอม A จะอยู่ในช่วง 2.8 ถึง 3.0 อังสตรอม ในตำแหน่งของอะตอม B จะเป็นอะตอมที่มีประจุเป็น +3 โดยที่อะตอม B จะมีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบ 6 อะตอมหรือเรียกว่าการจับพันธะแบบออกตะฮีดรัล (octahedral) โดยที่จะมีการใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกับอะตอม B ข้างเคียง ตัวอย่างของอะตอมในตำแหน่ง B ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และ แลนทานัม (La) เป็นต้น โครงสร้างเดลฟาอไซต์ประกอบด้วยชั้นหลักสองชั้นที่เรียงสลับสับเปลี่ยนกันไปซึ่งประกอบด้วยชั้นระนาบของอะตอม A ซึ่งจับกับออกซิเจนในแนวแกน c และชั้นของอะตอม B ซึ่งจับกับออกซิเจนแบบออกตะฮีดรัลหรือ BO_6 โดยโครงสร้างเดลฟาอไซต์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ 2 ชนิด โดยขึ้นกับทิศทางในการจัดเรียงตัวของแต่ละชั้น ในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABAB โดยมีทิศทางต่างกัน 180 องศา จะเรียกรวมการจัดเรียงโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล 2H ซึ่งอยู่ในสเปซกรุ๊ป (space group) แบบ $P6_3/mmc$ ถ้าในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABCABC โดยที่ AB มีทิศทางเดียวกันแต่ C ทิศต่างออกไป การจัดเรียงตัวแบบนี้เรียกรวมโบฮีดรัล 2H ซึ่งมีสเปซกรุ๊ปแบบ $R\bar{3}m$ โครงสร้างเดลฟาอไซต์ในตำแหน่งของอะตอม A จะมีอะตอมที่ใช้ได้ในตำแหน่งนี้แล้วเกิดความเสถียรเพียงสี่อะตอมเท่านั้น แต่ในตำแหน่งของอะตอม B นั้นจะมีอะตอมที่มีความเหมาะสมอยู่หลายชนิด

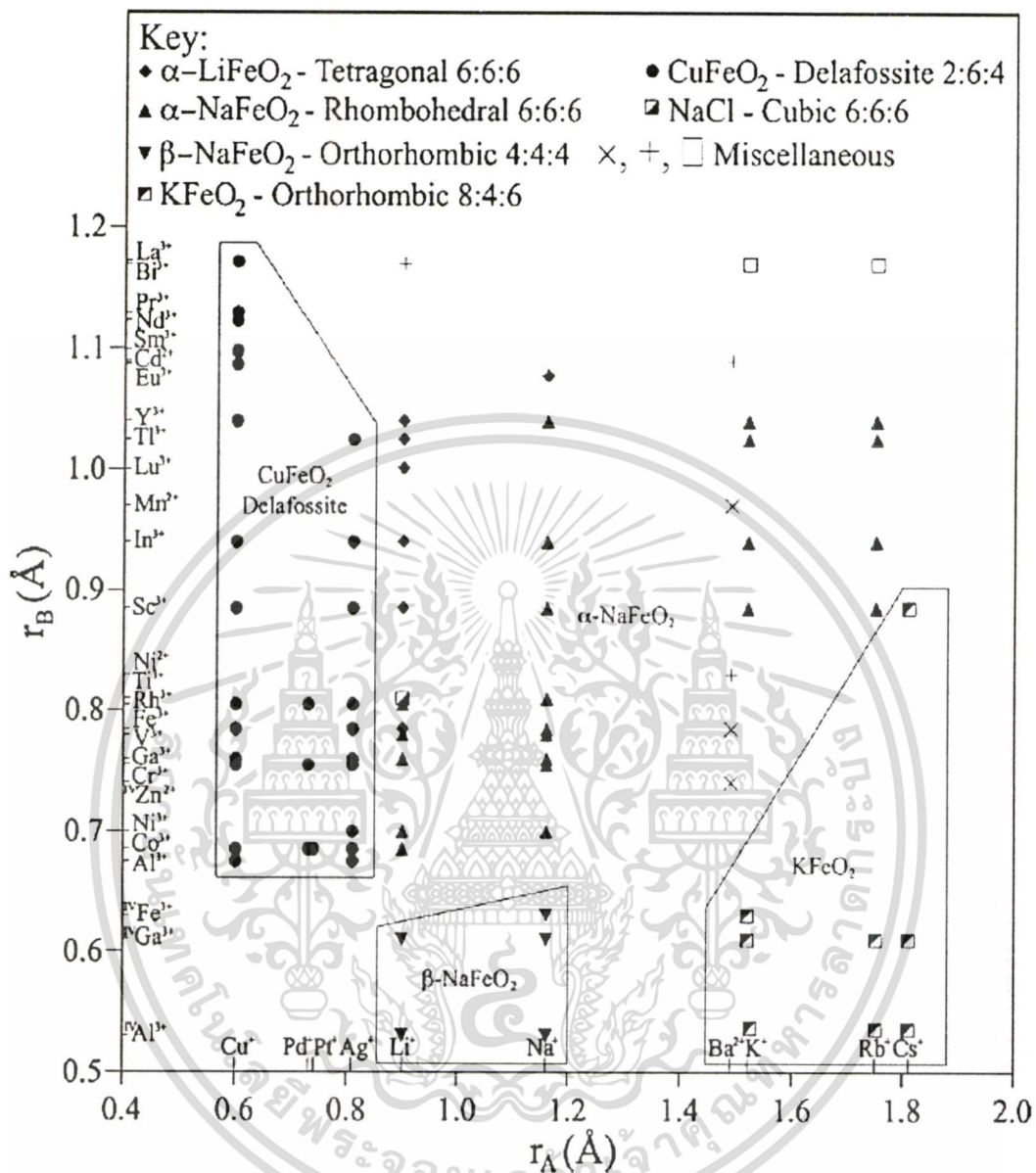


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเดลฟาอไซต์

ก การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบรอมโบฮีดรัล 2H

ข การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนัล 2H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิคาร์ซีมีไอออนของโครงสร้างผลึกแบบเดลาฟอสไซต์ของสารประกอบชนิดต่างๆ

2.1.4 ขอบครอบผลึก [17-23]

ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด โดยเฉพาะ โครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของขอบครอบผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตของเกรน (grain and grain boundaries)

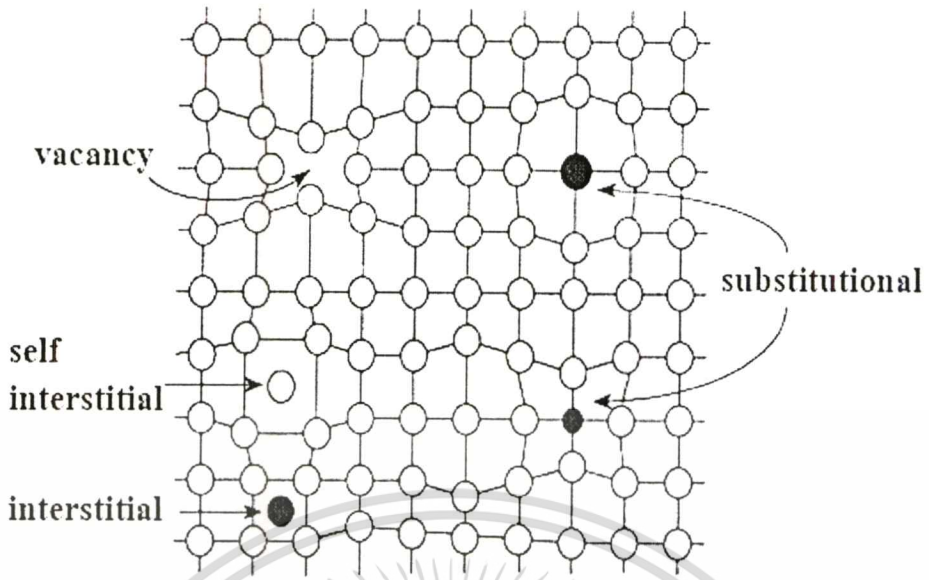
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.7 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

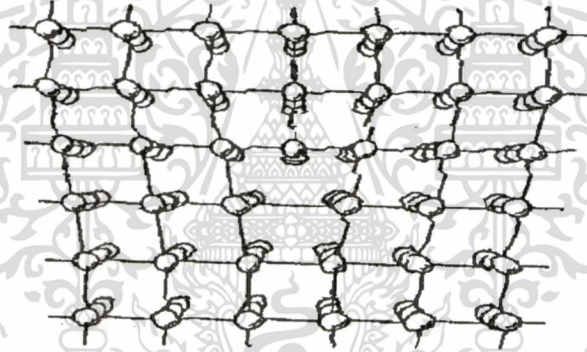
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

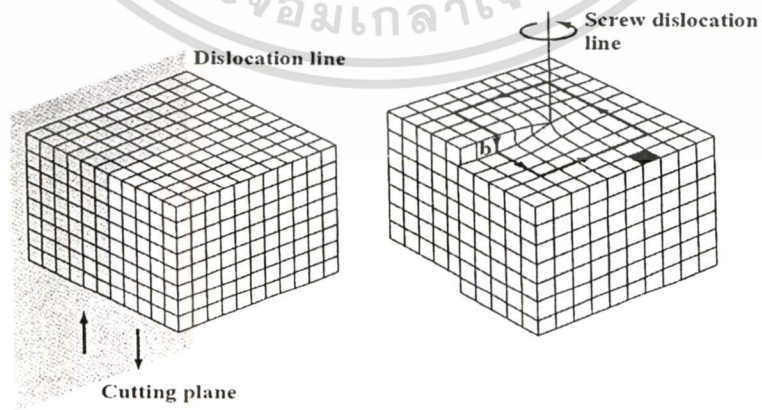
ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.8 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



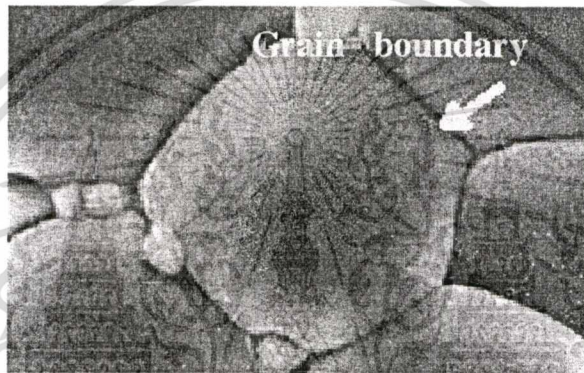
รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), ตลอดจนเกรนและขอบของเกรน

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.10 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.10 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน

2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [18-24]

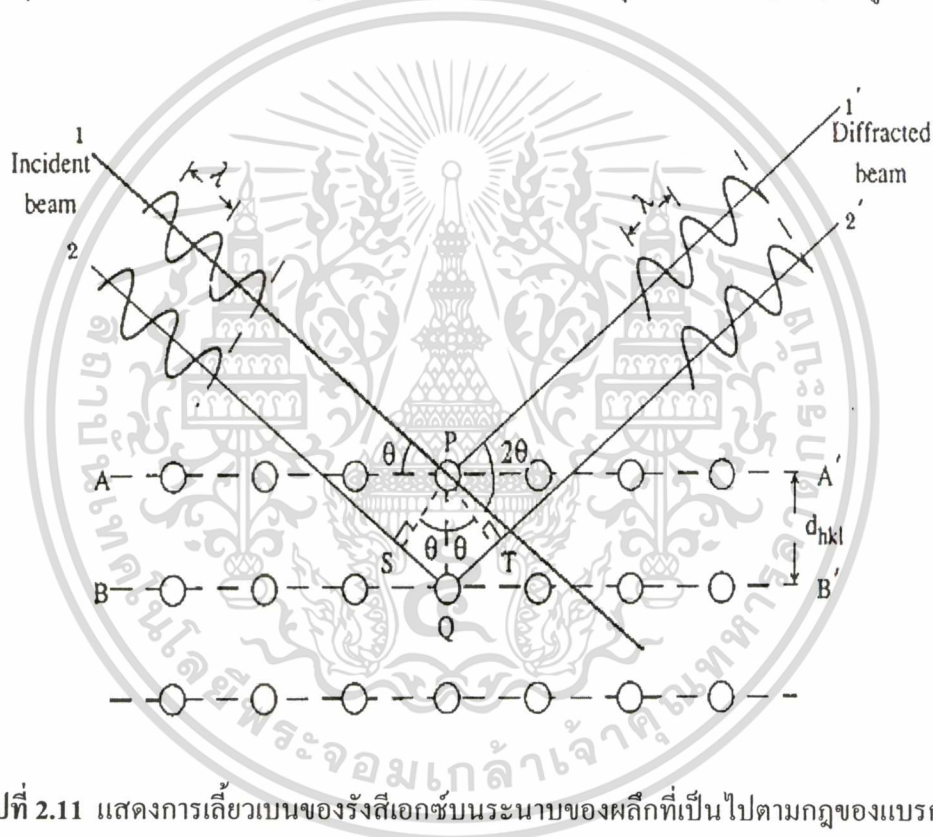
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าว จะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \tag{2.2}$$

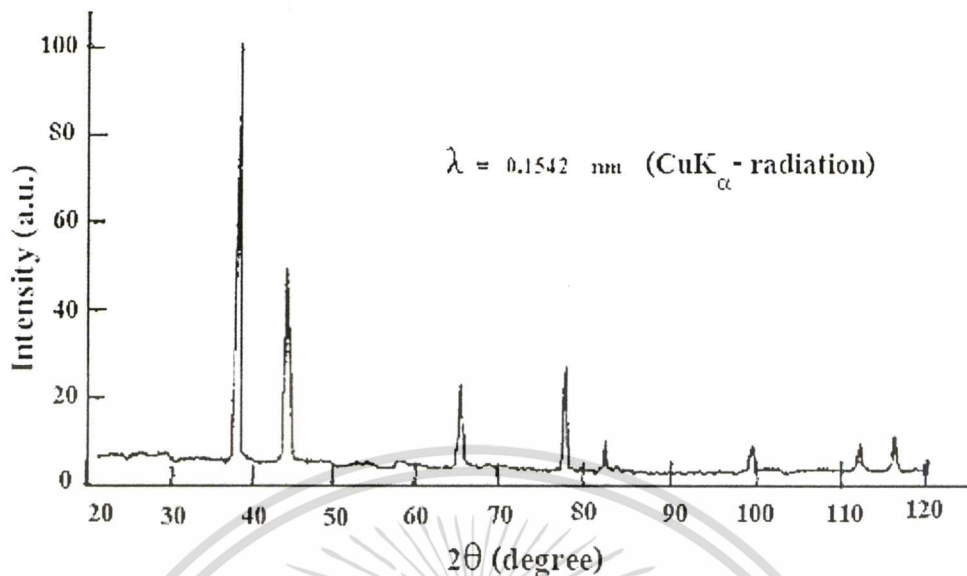
เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
	θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับ มุมตกกระทบ
	n	คือ	ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
	λ	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

รูปที่ 2.12 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ(2.3)

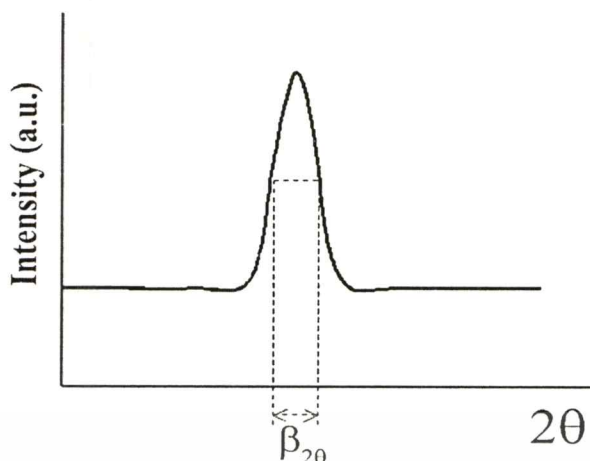
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ (2.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ระนาบของผลึก



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการหา β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิจารณารูปที่ 2.13 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{20} \cos \theta} \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 K คือ ค่าคงตัวซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 β_{20} คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [26-27]

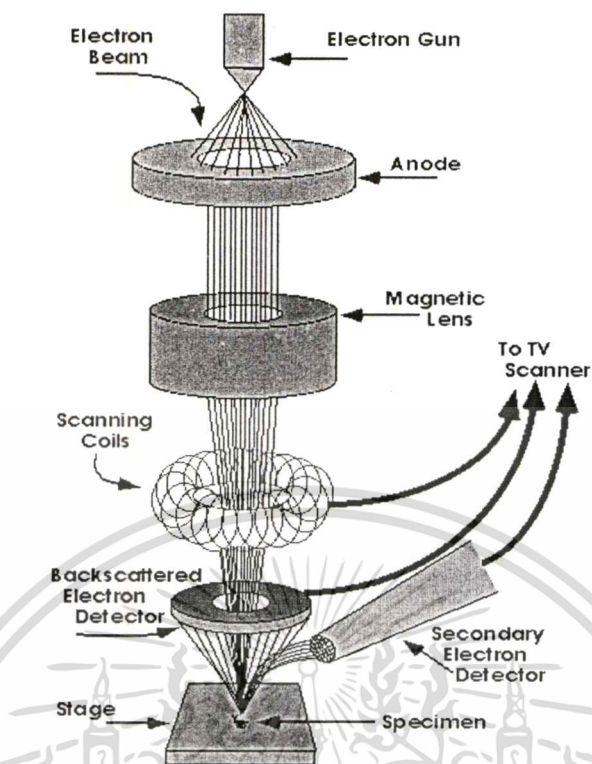
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [41]

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
- easy	5 μm	0-2 μm
- skilled	0-2 μm	10 nm
- special	0-1 μm	0-5 nm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
- transmission	Yes	Yes
- refraction	Yes	Yes
- diffraction	Yes	Yes
- other	Some	Many
Field of view	Small	Large enough
Signal	Only as image	Available for processing
Cost	Low	High

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.13 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวีย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

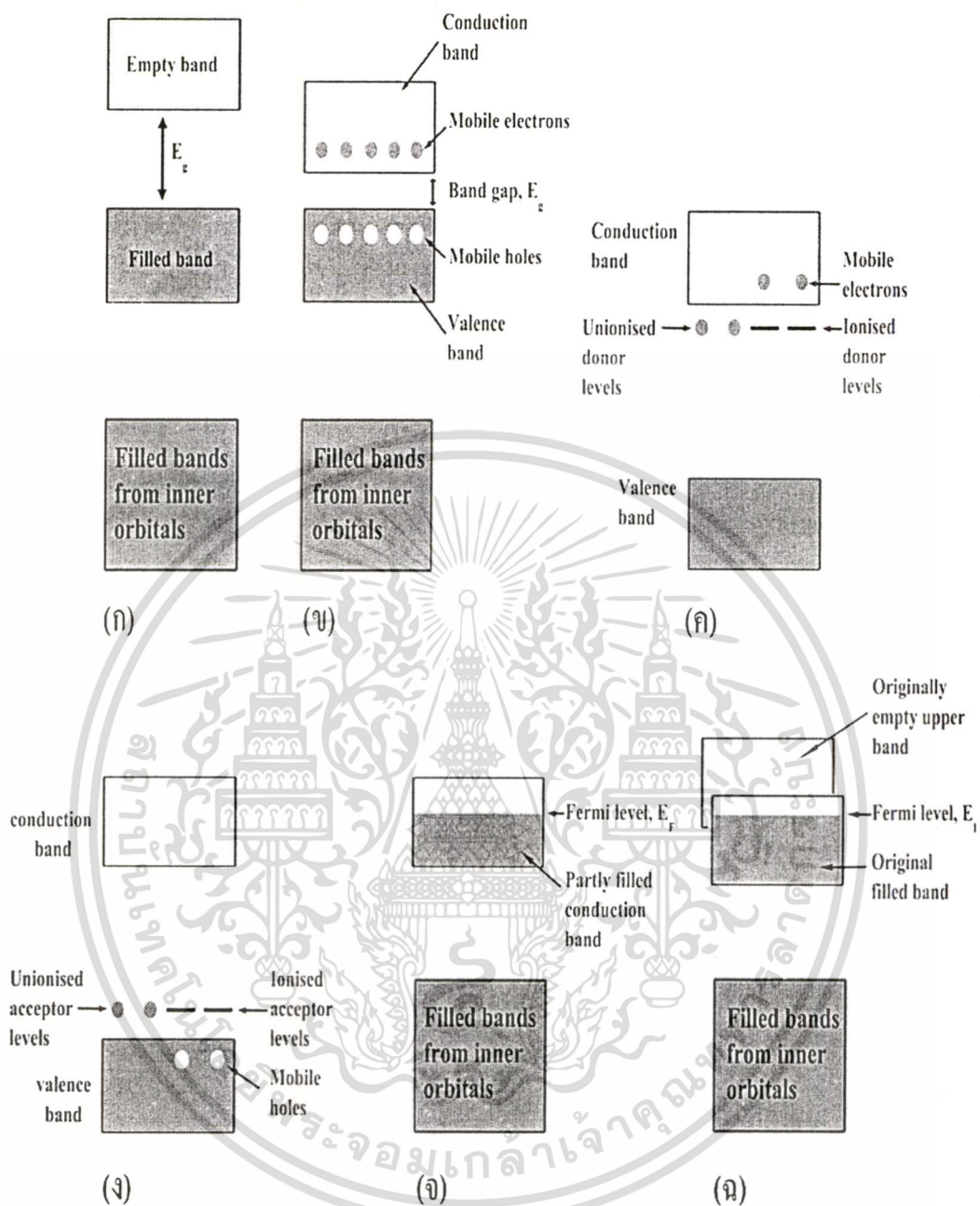
2.2 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำ พฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสงและการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [17-23, 39]

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่น้อย 3 ส่วน คือ แถบนำไฟฟ้า (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal หรือ conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- ก ฉนวน
- ข สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ โลหะ
- ฉ สารกึ่งโลหะ

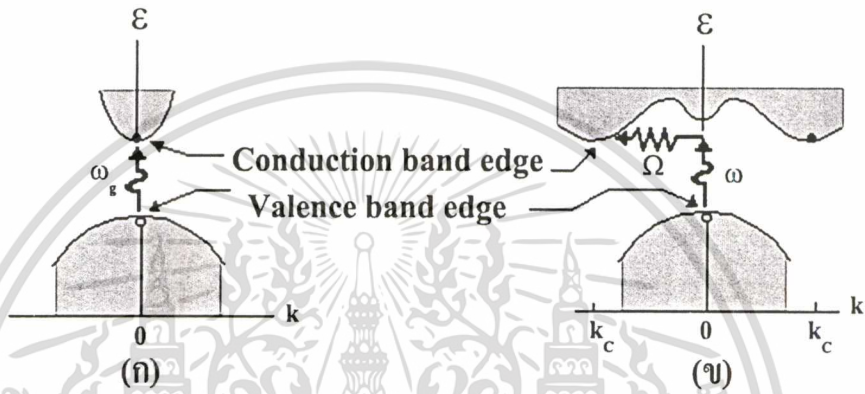
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน จากขอบล่างสุดของแถบว่าง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 eV ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมาก เพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูป 2.15 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ใน แถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างที่เกิดจากมีอิเล็กตรอนหลุดหายไปจากแถบพลังงานวาเลนซ์นี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูป 2.15 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูป 2.15 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็น โลหะหรือตัวนำจะพบว่ามีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วน (รูป 2.15 (จ)) และเรารู้ได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.15 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มีอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ

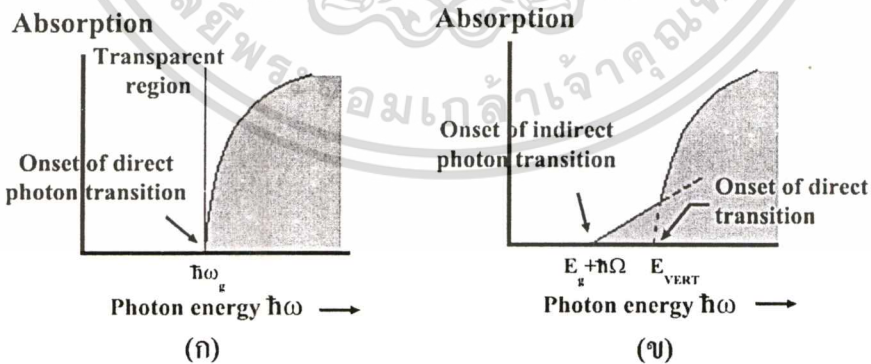
ลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega)$ นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้าง โฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)



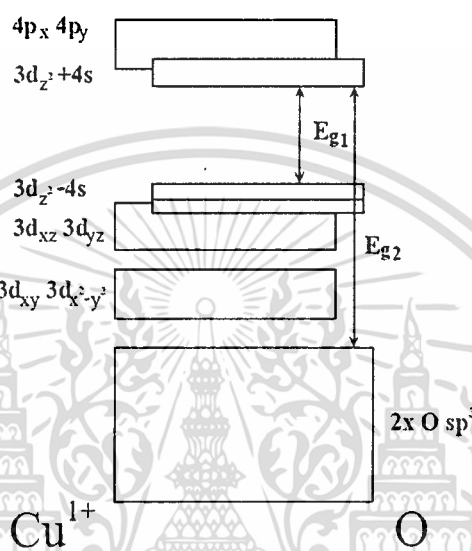
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)
 ก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)
 ก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

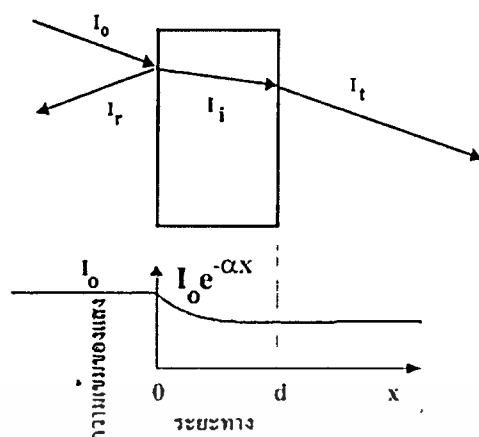
สำหรับสารประกอบ CuAlO_2 แถบวาเลนซ์จะเกิดจาก ออร์บิทัล $3d_{z^2} - 4s$ ของอะตอม Cu ส่วนแถบนำเกิดจากออร์บิทัล $3d_{z^2} + 4s$ ของอะตอม Cu จากรูปที่ 2.18 จะพบว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงคือ การย้ายสถานะระหว่าง ออร์บิทัล sp^3 ของอะตอมออกซิเจนไปยังออร์บิทัล $4d_{z^2} + 5s$ ของอะตอม Cu แต่สำหรับการย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียงจะเกิดจากการย้ายสถานะระหว่าง ออร์บิทัล $3d_{z^2} - 4s$ ไปยังออร์บิทัล $3d_{z^2} + 4s$ ซึ่งอยู่ภายในอะตอม Cu



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างออร์บิทัลของ CuAlO_2

2.2.2 การส่งผ่านแสง [18-23,]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบ फिल्मบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบาง และถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.6)$$

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.7)$$

เมื่อ

I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.8)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_i = I_0 \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_i}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [17-23]

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืน และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.11)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.12)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.13)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียชีวิต (extinction coefficient)
โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [17-23]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบ วาเลนซ์จุดที่

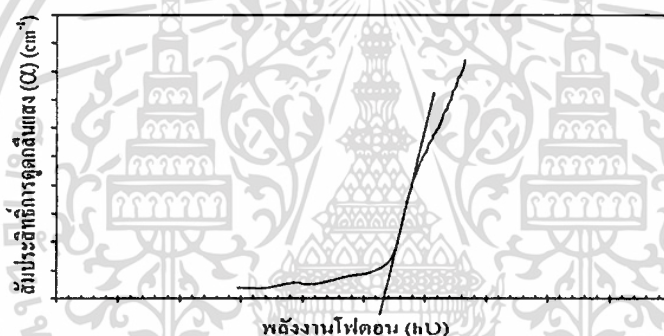
เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.19 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็นสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.17)$$

และสำหรับกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.18)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงตัว

2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบการนำ สารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 eV ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [17-23, 30-31]

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความ

หนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบแฟร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.19)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.19)$$

- เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบแฟร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่ อุณหภูมิ T ใดๆ
- E_F คือ ระดับพลังงานแฟร์มี (Fermi energy level)
- k คือ 1.38×10^{-23} J/K ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant)
- T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

2.3.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_c(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.20)$$

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว ดังนั้น

$$N_c(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.21)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ
 h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)
 $= 6.625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

จากสมการที่ (2.21) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์กลางอยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั้น ก็อจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_i &= \int_0^{E_i} n(E) dE \\ &= \int_0^{E_i} N_c(E) f(E) dE \end{aligned} \quad (2.22)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ
 โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานช้อน (non-degeneracy) และ $n(E)d(E)$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.22) จึงสามารถขยายขอบเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.22) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{2/3}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.23)$$

เนื่องจาก $\exp[(E - E_F)/kT] + 1 \gg 1$ นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp \left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.25)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp \left[-\frac{E_F + E_g}{kT} \right] \quad (2.26)$$

โดย
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.27)$$

- เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน
 m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์
 N_v คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้น จากสมการที่ (2.26) และสมการที่ (2.27) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.28)$$

และ
$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right] \quad (2.29)$$

หรือ
$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right)^{3/4} \exp \left[-\frac{E_g}{2kT} \right] \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

2.3.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิคเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน และ โฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp \left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.31)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.32)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานช้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

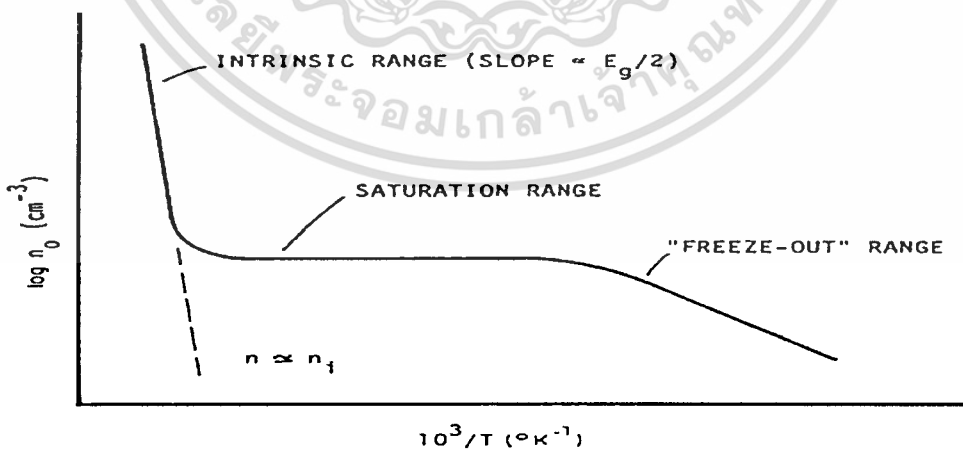
$$np = n_i^2 = N_C N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.33)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level: E_d) และอะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level: E_a) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.34)$$

เมื่อ n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ
 N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ
 n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.21 [32] คือ



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้จะคอมของสิ่งเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.34) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.36)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.37)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.36) และ (2.38) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.38)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.27) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.39)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.39) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.41)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.31), (2.40) และ (2.41) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.33) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.43)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.44)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N'_c จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.44) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (Binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N'_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} + \dots$$

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.45)$$

ถ้า $N_a \gg N'_c$ สมการที่ (2.45) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า N_d มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N'_c \gg N_s$ จะทำให้สมการที่ (2.46) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.47)$$

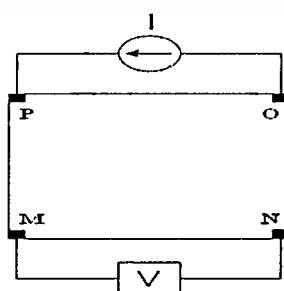
หรือ
$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.48)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.47) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_s < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.48) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_s < N_d$

2.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ [30-31, 33-35]

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.23 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.49)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.49)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.50)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.50)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.51)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.52)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.53)$$

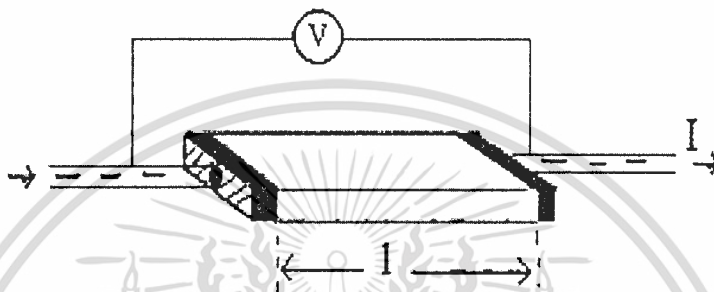
เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.3.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method) [30-31, 33-36]

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้น

จึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.24 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

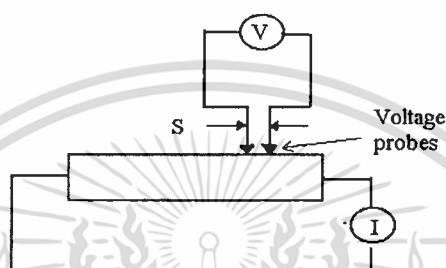
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.54)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.55)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัด โดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.3.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)[30-31, 33-36]

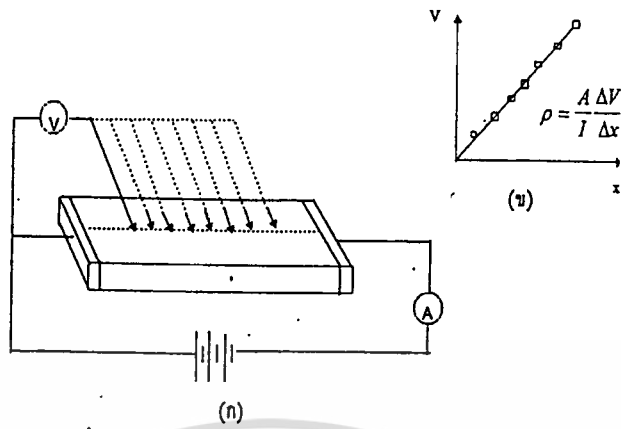
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็น ในรูปที่ 2.25 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้น จากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบ ความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.25 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรง เรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่ห่าง จากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุด ที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการ รวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วน ระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสาม เท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้า ไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมา เขียนกราฟดังรูปที่ 2.26 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดี ของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิว ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.5 ปรัชการณฮอลล์ (Hall effect) [17-23, 30-32]

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \tag{2.56}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{p\mu_h} \tag{2.57}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_h)} \tag{2.58}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_h คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.56) และ (2.57) คือ

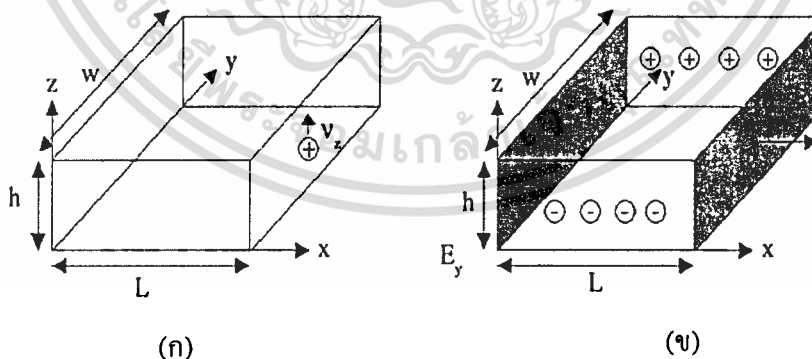
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\text{ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.59)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\text{ความหนาแน่นของโฮล} \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_h} \quad (2.60)$$

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



รูปที่ 2.27 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว z หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ z ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_z เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง z คือ I_z ดังสมการที่ (2.61)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.61)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_z = qnwhv_z \quad (2.62)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.63)$$

จากรูปที่ 2.26

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.64)$$

$$A = w.h \quad (2.65)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_z) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.63) (2.64) และ (2.65)

$$\rho = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{wh}{L} \quad (2.66)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_x) ที่กระทำกับชั้นสารในทิศ x อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ y สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดโวลต์จันที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_z \times B_x) + qE_y \quad (2.67)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_z B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z}{wh} \cdot B_x \quad (2.68)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.68) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_z B_x \quad (2.69)$$

เมื่อ $J_z = \frac{I_z}{wh}$ (2.70)

แล้ว $R_H = \frac{E_y}{J_z B_x} = \frac{1}{qn}$ (2.71)

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_b^w E_y dy = \int_b^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z B_x}{wh} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_x}{h} \end{aligned} \quad (2.72)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \quad (2.73)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_z}{V_H} \cdot \frac{B_x}{qh} \quad (2.74)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลาย ๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.75)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น $R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.76)$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี $R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.77)$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์

ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.78)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกล็อกไอออนในซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.79)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 G ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.56) และ (2.79) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.80)$$

หรือ จากสมการที่ (2.80)
$$\mu_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.81)$$

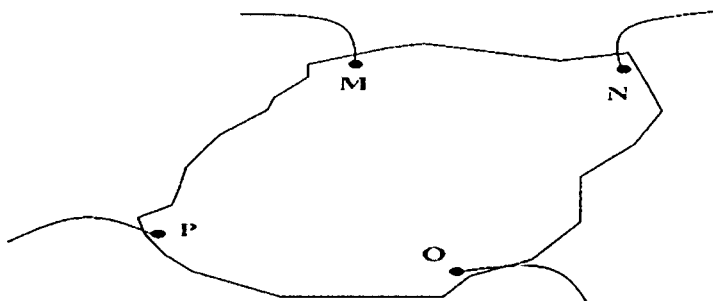
สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.3.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ [18-23, 25-26, 32-34, 37-38]

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

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M N O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.28 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.82)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \frac{d}{B} \Delta R_{MNOP} \quad (2.83)$$

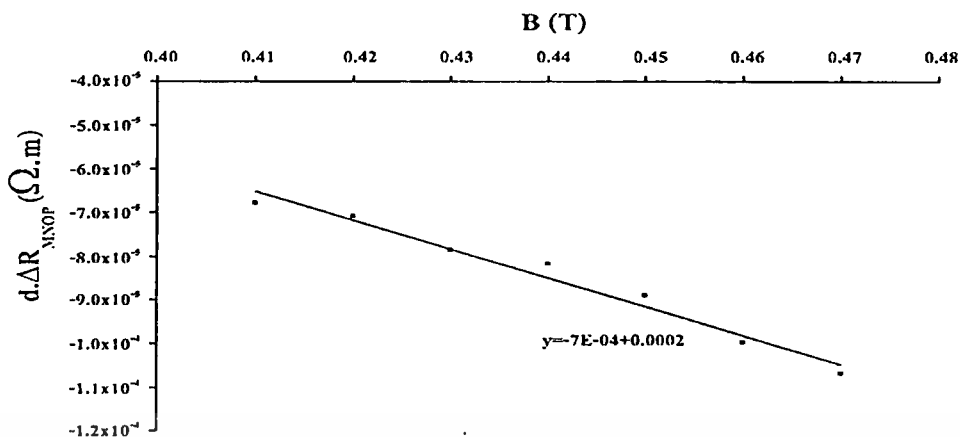
เมื่อ ΔR_{MNOP} คือ ผลต่างระหว่างค่า R_{MNOP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
 d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง
 B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.83) จะได้ว่า

$$d \Delta R_{MNOP} = R_H B \quad (2.84)$$

เมื่อทำการวาดกราฟระหว่าง $d \Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.28 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d\Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \cdot \Delta R_{MNOP} \tag{2.85}$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \tag{2.86}$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.4 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน [33-35, 36-40]

ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ด้านความร้อนและด้านไฟฟ้าในขณะเวลาเดียวกันโดยมีพลังงานจลน์และระดับพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอนเป็นตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์ เรียกว่า ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric effect) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำมีปรากฏการณ์ที่สำคัญมี 3 ชนิด คือ ปรากฏการณ์ซีเบก (Seebeck effect) ปรากฏการณ์เปลดิเยร์ (Peltier effect) ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

2.4.1 ปรากฎการณ์ซีเบก

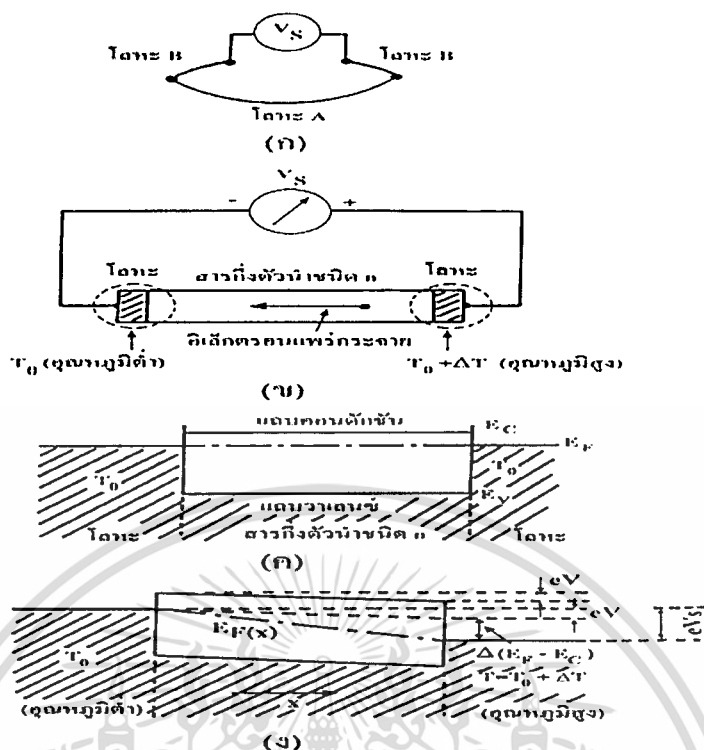
ถ้านำโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดมาต่อสัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ก) และทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยสัมผัสนั้นเท่ากับ ΔT จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_s) ขึ้นที่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบก และเรียก V_s ว่า ศักย์ไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric potential) โลหะถูกนำไปใช้งานประยุกต์เป็นเทอร์โมคัปเปิล โดยอาศัยปรากฏการณ์นี้

สัมประสิทธิ์ของซีเบก (S) มีนิยามดังนี้

$$V_s = S\Delta T \quad (2.87)$$

ตามปกติค่า V_s ของสารกึ่งตัวนำจะสูงกว่าของโลหะ ทำให้การวัดค่า S ของสารกึ่งตัวนำ กระทำได้ง่ายกว่า

ในรูปที่ 2.30 (ข) ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำชนิด n มีโลหะชนิดเดียวกัน 2 ชั้นติดสัมผัสอยู่และสมมุติว่าที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกันเป็น ΔT ถ้าอุณหภูมิของแท่งสารกึ่งตัวนำ อยู่ในย่านที่ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ที่ด้านปลายของสารกึ่งตัวนำที่ร้อนกว่าจะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าด้านเย็นดังนั้นอิเล็กตรอนก็จะพยายามแพร่กระจายจากด้านร้อน ไปสู่ด้านเย็น เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้อิเล็กตรอนมีประจุค้างอยู่มากขึ้น และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้านี้จะคอยผลการแพร่กระจายมาของอิเล็กตรอนและระบบก็จะอยู่ในสภาพสมดุล ดังนั้นในรูปที่ 2.30 (ข) จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีเครื่องหมายดังแสดงในรูป แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีพาหะข้างมากคือ โฮลซึ่งจะไหลจากที่อุณหภูมิสูง ไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ขั้วของแรงดันไฟฟ้าสลับกับกรณีชนิดเอ็นจากปรากฏการณ์นี้ถ้าดูเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นหรือพี



รูปที่ 2.30 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ก วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ข วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยังไม่มี ความแตกต่างของอุณหภูมิ

ง แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

แรงดันไฟฟ้าซีเบก (V_S) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับเฟอร์มิ E_F ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากเราเคยทราบแล้วว่า E_F ก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยเพราะฉะนั้นความลาดของเส้นของระดับพลังงานเฟอร์มิ จึงไม่จำเป็นต้องเท่ากับ ความลาดของแถบพลังงานจากรูป 2.30 (ง) V_S มีค่าเท่ากับ

$$V_S = \text{ปริมาณการเปลี่ยนตำแหน่งของขอบแถบนำไฟฟ้า (V) + การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อเทียบกับขอบ } E_C$$

$$= V + \frac{\Delta(E_F - E_C)}{e}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= V + \frac{d}{dT} \left(\frac{E_F - E_C}{e} \right) \Delta T \quad (2.88)$$

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่ซึมจะต้องสมดุลกับกระแสพัดพาที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขณะที่พาหะกำลังแพร่ซึมดังนั้น

$$\begin{aligned} D_n (-e) \frac{dn}{dx} &= n(-e) \mu_e E \\ &= n(-e) \mu_e \left(\frac{-dV}{dx} \right) \\ \frac{dV}{dx} &= - \frac{D_n}{n \mu_e} \frac{dn}{dx} \end{aligned} \quad (2.89)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะสมมติให้ความลาดของอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำนั้นสม่ำเสมอตลอดดังนั้น

$$\frac{dV}{dx} = \frac{V}{L} \quad \text{และ} \quad \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{L}$$

และจากความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์ $D_n = \frac{kT \mu_e}{e}$ และให้ $\frac{d_n}{dx} = \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dx}$ ดังนั้นสมการที่ 2.89 จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} \frac{V}{L} &= - \frac{\left(\frac{kT \mu_e}{e} \right) \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dx}}{n \mu_e} \\ &= - \frac{kT}{en} \left(\frac{dn}{dT} \right) \frac{\Delta T}{L} \\ V &= - \frac{kT \Delta T}{en} \left(\frac{dn}{dT} \right) \end{aligned} \quad (2.90)$$

เมื่อ n มีค่า

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{E_C - E_F}{kT} \right) \quad (2.91)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณค่า $(1/n)dn/dT = d \ln n/dT$ แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 13.5 จะได้ว่า

$$v = - \left\{ \frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} - \frac{d}{dT} \left(\frac{E_C - E_F}{e} \right) \right\} \Delta T \quad (2.92)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.88) และ (2.92) สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient) (S) คือ

$$S = - \left(\frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} \right) \quad (2.93)$$

ในการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่ได้คำนึงถึงความจริงที่ว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ได้แพร่กระจายจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำนั้นจะมีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้า (induced) จากที่อุณหภูมิต่ำไปสู่ที่อุณหภูมิสูงถ้าจะพิจารณาเทอมนี้ด้วยทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric potential) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสัมประสิทธิ์ซีเบกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีรูปเป็น

$$S = - \left(\frac{E_C - E_F}{eT} + 2 \frac{k}{e} \right) \quad (2.94)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.91) ลงในสมการที่ (2.94) ก็จะพบว่าในกรณีสารกึ่งตัวนำอนดีเจเนอเรต (nondegenerated semiconductor) ถ้าความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีค่าลดลง

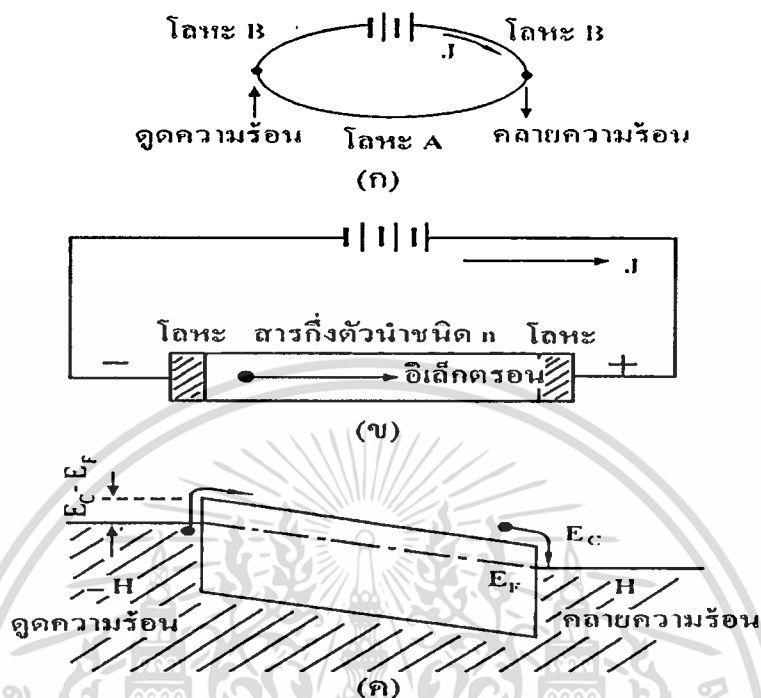
นอกจากนี้ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดอินทรินสิคหรืออยู่ในย่านอุณหภูมิอินทรินสิค (intrinsic region) ที่ด้านอุณหภูมิสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะเพิ่มขึ้นและพาหะทั้งสองจะแพร่กระจายไปสู่ด้านอุณหภูมิต่ำ และก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น แต่เนื่องจากทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนและโฮลมีทิศทางหักล้างกันดังนั้นแรงดันไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้นั้นจะเกิดจากแฟกเตอร์ของความแตกต่างของความคล่องตัวของพาหะทั้งสองชนิดซึ่งมีค่าน้อยมาก

2.4.2 ปรากฏการณ์เพลติเยร์

การต่อตัวนำที่มีอุณหภูมิเท่ากันสองชนิดให้สัมผัสกัน และปล่อยให้กระแสไฟฟ้า J ไหลดังแสดงในรูปที่ 2.31 (ก) จะทำให้เกิดการปล่อยหรือดูดความร้อน (W) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพลติเยร์ (Peltier effect) นิยามสัมประสิทธิ์เพลติเยร์ (Peltier coefficient) คือ

$$W = \Pi J$$

(2.95)



รูปที่ 2.31 ปรากฏการณ์เพลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. หลักการวัดปรากฏการณ์เพลติเยร์
- ข. วงจรเพลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิด n
- ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแสไฟฟ้า J ไหล

ต่อไปลองพิจารณารอยต่อสัมผัสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและโลหะ และปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหล J ดังแสดงในรูปที่ 2.31 (ข) จากรูปที่ 2.31 (ค) อิเล็กตรอนที่สามารถไหลจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้นั้นจะต้องเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าแฟงค์กีย์ $(E_C - E_F)/e$ และเมื่อรวมพลังงานจลน์เข้าไปอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเป็น $(E_C - E_F)/e + (3/2) kT$ การไหลของอิเล็กตรอนออกจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะเป็นการทำให้อิเล็กตรอนดึงพลังงานออกจากโลหะทำให้โลหะสูญเสียพลังงาน และโลหะก็จะเย็นตัวลงและอีกทางปลายด้านหนึ่งอิเล็กตรอนก็จะนำพลังงาน $(E_C - E_F)/e + (3/2) kT$ ไปให้กับโลหะทำให้โลหะอีกด้านหนึ่งร้อนขึ้น เพราะฉะนั้นพลังงาน ΔE ที่อิเล็กตรอน 1 ตัวนำพาไปคือ

$$\Delta E = (E_C - E_F) + \frac{3}{2} kT \quad (2.96)$$

ปริมาณความร้อน (W) ที่ถูกปล่อยออกมาหรือดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้โดยการคูณสมการที่ (2.96) ด้วยจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลต่อหน่วยเวลา นั่นคือ

$$W = \frac{\Delta EJ}{e} = \left(\frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3 kT}{2 e} \right) J \quad (2.97)$$

เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์เปลติเยร์มีค่า

$$\Pi = \frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3 kT}{2 e} \quad (2.98)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.93) และ (2.98) จะพบว่าสัมประสิทธิ์ซีเบกและสัมประสิทธิ์เปลติเยร์ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\Pi = ST \quad (2.99)$$

ปรากฏการณ์เปลติเยร์ถูกนำไปใช้งานในการทำอุปกรณ์การทำความเย็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัสดุ Bi_2Te_3 และ Sb_2Te_3

2.4.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า I เข้าสู่เส้น โลหะที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกัน ΔT จะเกิดการคายหรือดูดกลืนความร้อนปริมาณ $\tau \Delta T$ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) τ คือสัมประสิทธิ์ทอมสัน (Thomson coefficient) ซึ่งมีค่าคงตัวของวัสดุหนึ่งๆ (แตกต่างกับ S กับ Π ซึ่งเกี่ยวข้องกับรอยต่อของวัสดุสองชนิด) τ จะมีค่าเป็นบวกถ้าเกิดการคายความร้อนโดยกระแสไหลจากที่อุณหภูมิสูง ไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ

สัมประสิทธิ์ทอมสันมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบกดังนี้

$$T \frac{dS_{ab}}{dT} = \tau_a - \tau_b \quad (2.100)$$

หรือ

$$S_{ab} = \frac{\tau_{ab}}{T} = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT - \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.101)$$

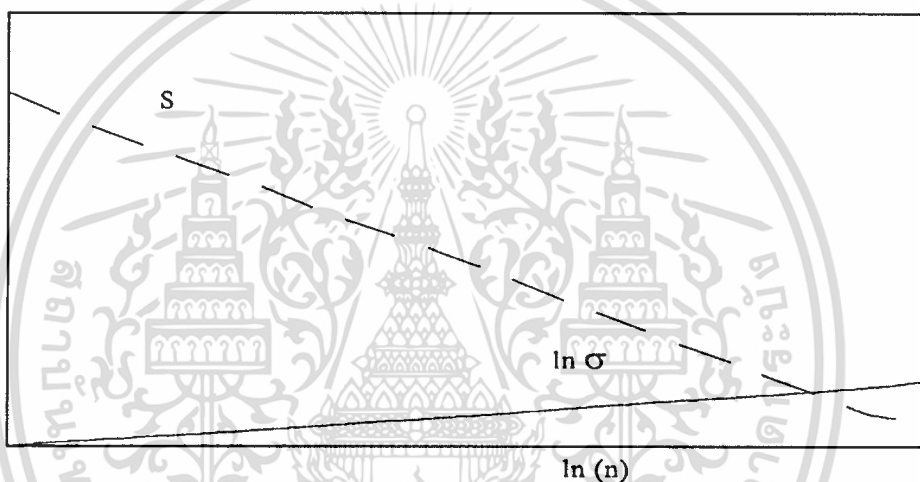
ความสัมพันธ์นี้เรียกว่าความสัมพันธ์เคลวิน (Kelvin relation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ที่ 3.00 จะสังเกตเห็นได้ว่า S_{ab} เป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับรอยต่อของโลหะ 2 ชนิด และสามารถเขียนได้ในรูปของผลต่างของ τ_a และ τ_b ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับโลหะทั้งสอง ถ้าให้ว่า

$$S_a = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT \quad \text{และ} \quad S_b = \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.102)$$

จากความสัมพันธ์เหล่านี้จึงกล่าวได้ว่าสมการที่ 3.02 ก็คือนิยามของค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ซีเบก (absolute Seebeck coefficient) ของวัสดุ a และวัสดุ b นั้นเอง



รูปที่ 2.32 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบก สภาพนำไฟฟ้า และปริมาณพาหะ

2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [23, 29, 38, 41]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็น วิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียม ในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.5.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และ Knudsen พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.103)$$

เมื่อ Φ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
 P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
 M คือ มวลโมเลกุล
 T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate : Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.104)$$

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

2.5.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.105)$$

ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (3.05) ใหม่ได้เป็น

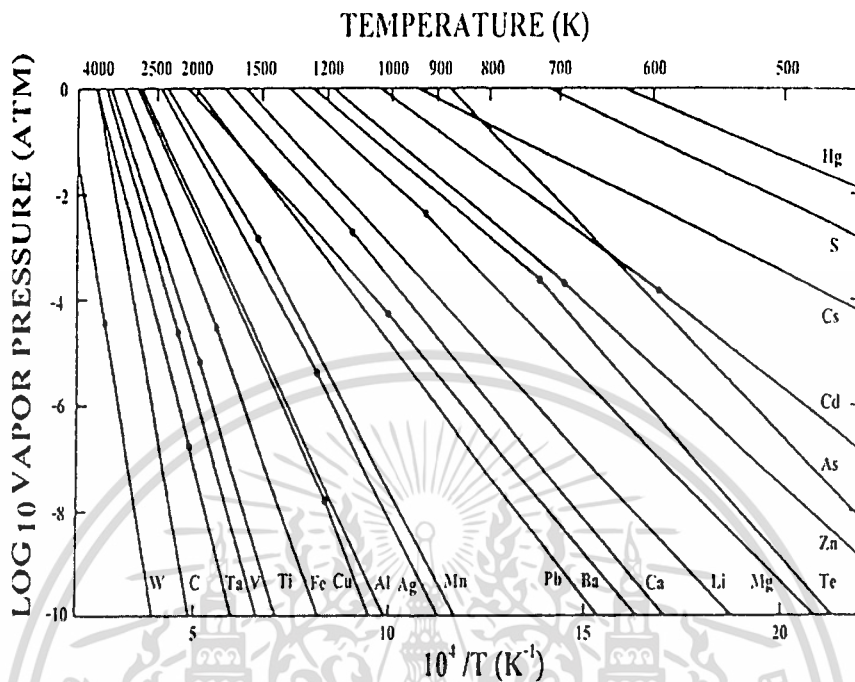
$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.106)$$

ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

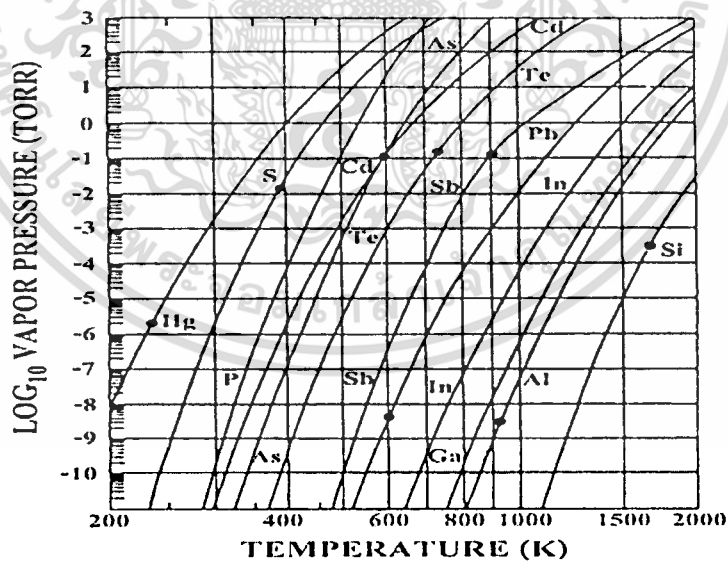
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.107)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.34 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.5 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

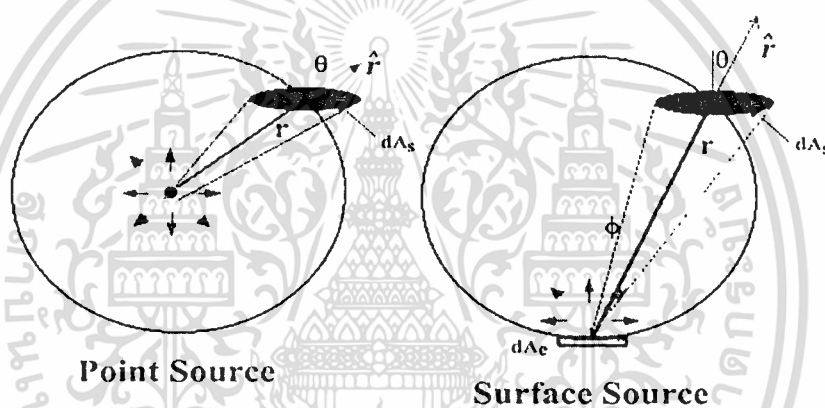
ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX(s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + \frac{1}{2} X_2(g)$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se
	$MX(s) \rightarrow M(l) + \frac{1}{n} X_n(g)$	สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(s) \rightarrow M(g) + \frac{1}{2} X_2(g)$	
	X = S, Se, Te	CdS, CdTe, CdSe
(ก) ชาลิโคจีไนต์		
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(s) + \frac{1}{2} O_2(g)$	SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂

M = โลหะ, X = อโลหะ

2.5.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหวมถึงฐานรองที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นใน ระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass : \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.108)$$



รูปที่ 2.35 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่ A_e คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.33 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.109)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c$$

แฟกเตอร์ $\cos \phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi r (\sin \phi) r d\phi$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi r^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi r^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.110)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.111)$$

เมื่อ $n=1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n = 0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ในรูปแบบที่เป็นทั้งเซรามิก ฟิล์มหนา และฟิล์มบางซึ่งจะได้กล่าวถึงกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีปฏิบัติกริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก [28, 42-47]

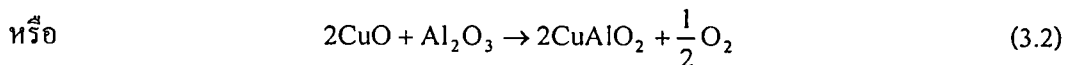
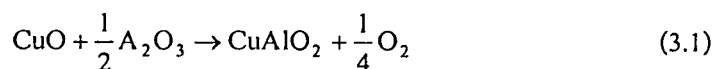
มีวิธีดำเนินการทดลองดังนี้

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

- สารตั้งต้น
 1. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)
 2. อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
 3. แมกนีเซียมไนเตรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- ครกอาเกต
- ชุดเครื่องมืออัดเม็ด
- เครื่องอัดเม็ดสาร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
- เตาเผาสาร
- ครุชีเบิล

3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

เราจะใช้ CuO ร่วมกับ Al_2O_3 ให้ได้ CuAlO_2 1 กรัมมีวิธีในการคำนวณดังนี้ จากสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\text{CuO} &= 63.546 + 15.9994 \\ &= 79.5454 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.5[2(26.9815) + 3(15.9994)] \\ &= 0.5(101.9612) \\ &= 50.9806 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{CuAlO}_2 &= 63.546 + 26.9815 + 2(15.9994) \\ &= 63.546 + 26.9815 + 31.9988 \\ &= 122.5263 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ CuO หนัก 79.5454 g/mol รวมกับ Al₂O₃ หนัก 50.9806 g/mol จะได้ CuAlO₂ หนัก 122.5263 g/mol ดังนั้นถ้าเรา CuAlO₂ 1 g/mol จะต้องใช้ CuO และ Al₂O₃ ดังนี้

$$\text{CuO} = \frac{79.5454}{122.5263} \text{ g/mol}$$

ดังนั้นจะ CuO เท่ากับ 0.6492

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{50.9806}{122.5263} \text{ g/mol}$$

ดังนั้นจะใช้ Al₂O₃ เท่ากับ 0.4161 g/mol

CuAl_{1-x}Mg_xO₂ (0 ≤ x ≤ 0.25) จะแสดงการคำนวณที่กรณีเจืออะตอมของธาตุ Mg ที่ x=1 เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของธาตุ Al จากสมการ



ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\text{CuO} &= 63.546 + 15.994 \\ &= 79.5454 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0.495\text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.495[2(26.9815) + 3(15.9994)] \\ &= 0.495[53.963 + 47.9982] \\ &= 0.495(101.9612) \\ &= 50.4708 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}0.01\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 0.01[24.312 + 2[14.0067 + 3(15.9994)] + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 2(62.0049) + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 124.0098 + 108.09204] \\ &= 0.01(256.41384)\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 2.5641 \text{ g/mol} \\
 \text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2 &= 63.546 + 0.99(26.9815) + 0.01(24.312) + 2(15.9994) \\
 &= 63.546 + 26.711685 + 0.24312 + 31.9998 \\
 &= 122.499605 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าเราต้องการ $\text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2$ ปริมาณ 1 กรัมจะต้องใช้

$$\text{CuO} = \frac{79.5454}{122.499605}$$

ดังนั้นจะใช้ CuO เท่ากับ 0.6494 g/mol

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{50.4708}{122.499605}$$

ดังนั้นจะใช้ Al_2O_3 เท่ากับ 0.4120 g/mol

$$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{2.5641}{122.499605}$$

ดังนั้นจะใช้ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 0.0209 g/mol

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

Composition (x) of Mg	CuO (g/mol)	Al_2O_3 (g/mol)	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g/mol)
0	0.4921	0.4161	-
0.01	0.6494	0.4120	0.0209
0.05	0.6499	0.3957	0.1048
0.10	0.6506	0.3753	0.2097
0.15	0.6513	0.3548	0.3149
0.20	0.6521	0.3343	0.4204
0.25	0.6528	0.3138	0.5260

3.1.3 วิธีการเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

3.1.3.1 นำผงผลึก CuO และ Al_2O_3 ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอวกาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.1.3.2 การเจืออะตอมของธาตุ Mg จะทำการเจือในปริมาณ 1, 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับอะตอมของธาตุ Al โดยที่ในการบดสารจะทำเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1

3.1.3.3 เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดโดยจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 2 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.4 นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ในครุชีเบล ปิดฝาให้มีมิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา

3.1.3.5 ในการเผาจะใช้อุณหภูมิในการเผา 1,100 องศาเซลเซียส โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิทีละ 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง

3.2 การเตรียมเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [28, 42-45]

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

- ผงผลึก CuAlO_2
- เอททีเลนไกล โกล (ethylene glycol)
- แผ่นกระจกสไลด์
- แท่นพิมพ์สกรีน
- เต้าเอนนี่ล

3.2.2 วิธีการเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีน

3.2.2.1 นำผงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่ได้จากหัวข้อ 3.1 มาบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.2.2.2 นำผงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่บดแล้วมาผสมกับเอททีเลนไกล โกล

3.2.2.3 นำสารละลายเคมีที่ได้มาเตรียมฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

3.2.2.4 นำฟิล์มที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์นั้นจะเป็นผงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ

CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 โดยมีวิธีการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2

- เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- ผงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 3.1
- เต้าแอนนีส
- ครกอาเกต
- กระจกสไลด์

3.3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CuAlO_2 โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมันด้วยอะซิโตน และเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำผงผลึกเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.1 บรรจุลงในภาชนะระเหยสารตั้งต้นซึ่งเป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ววางลงบนหน้าฉากซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารดูว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วล้อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
6. เปิดปั๊มกลโรตารีประมาณ 2 นาทีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดัน 3×10^{-3} มิลลิบาร์ เปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ ความดันช่วง 3.1×10^{-5} - 3.0×10^{-5} มิลลิบาร์
7. เริ่มทำการระเหยสาร โดยมีกระจกสไลด์เป็นแผ่นรองรับ โดยการเปิดสวิตซ์เวริแอกแล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 110-120 แอมแปร์ แล้วแต่กรณีทิ้งไว้เป็นเวลา 10, 20, 30, 40, และ 80 นาที (ในกรณีที่เกิน 30 นาที ต้องทำซ้ำจนกว่าจะครบเวลา ไม่ใช่ระบบระเหยสารต่อเนื่องเกิน 30 นาที เนื่องจากระบบระเหยสารร้อนเกินไป)
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดสวิตเตอร์และปิดเวริแอกให้ระบบทำงานเป็นเวลาประมาณ 45 นาทีแล้วปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ
10. นำกระจกสไลด์ที่เคลือบแล้วออกมา

3.4 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ทั้งในรูปแบบที่เป็น เซรามิก ฟิล์มหนา ฟิล์มบาง [28, 42-47]

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆดังนี้

3.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

3.4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.4.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

ทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของ Shimadzu รุ่น 3101PC

3.4.4 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
- อิเล็กโตรมิเตอร์ ของ Keithley รุ่น 610 CR
- มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

3.4.5 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาของ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ ของ Keithley รุ่น 236
- เครื่องวัดอุณหภูมิของ Digicon รุ่น Dp-50A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

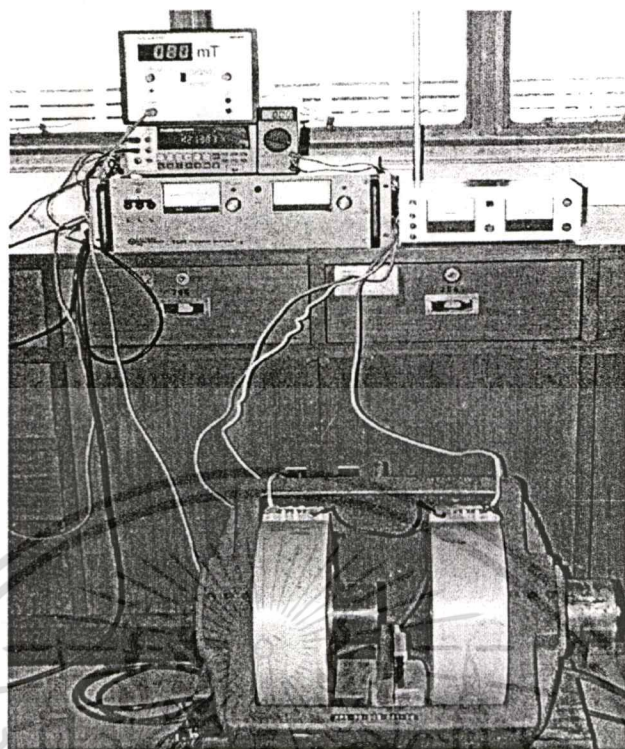
- เตาให้ความร้อน
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

3.4.6 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

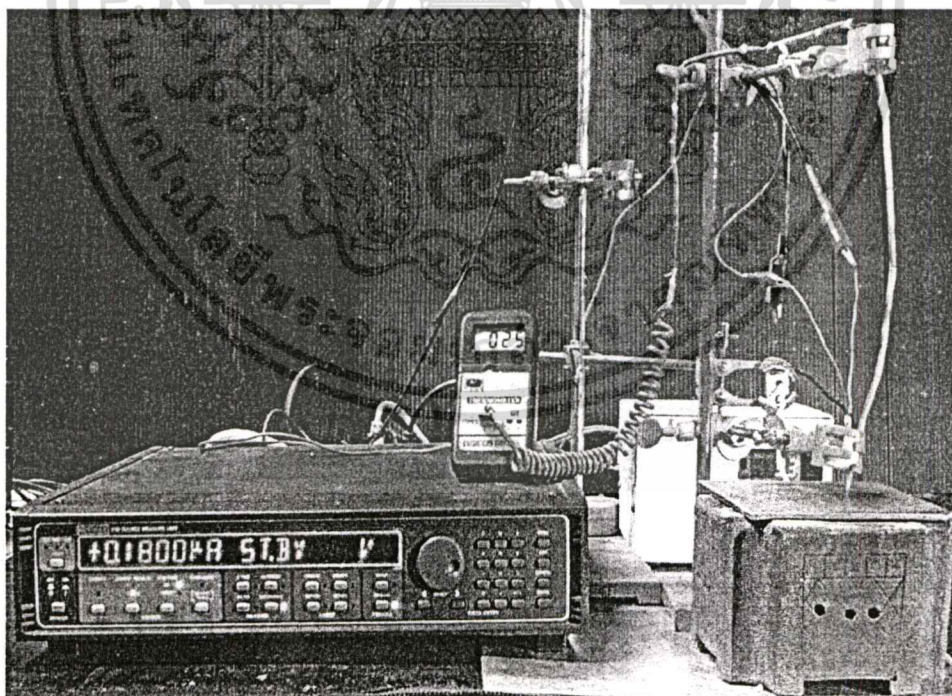
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงค่าสูงของ Electronic Measurement Inc.
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับค่าได้ของ Dolphin Electronic
- เครื่องวัดสนามแม่เหล็กพร้อมหัววัดของ Phywe
- มัลติมิเตอร์รุ่น 8842A ของบริษัท Fluke
- มัลติมิเตอร์ของ Digicon รุ่น DM-810A
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ

3.4.7 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาของ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
- แหล่งจ่ายกระแสไฟตรงคงที่ ของ Keithley รุ่น 236
- เครื่องวัดอุณหภูมิของ Digicon รุ่น Dp-50A
- เตาให้ความร้อน
- เครื่องทำความเย็น
- กาวเงินนำไฟฟ้า
- สายไฟ



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

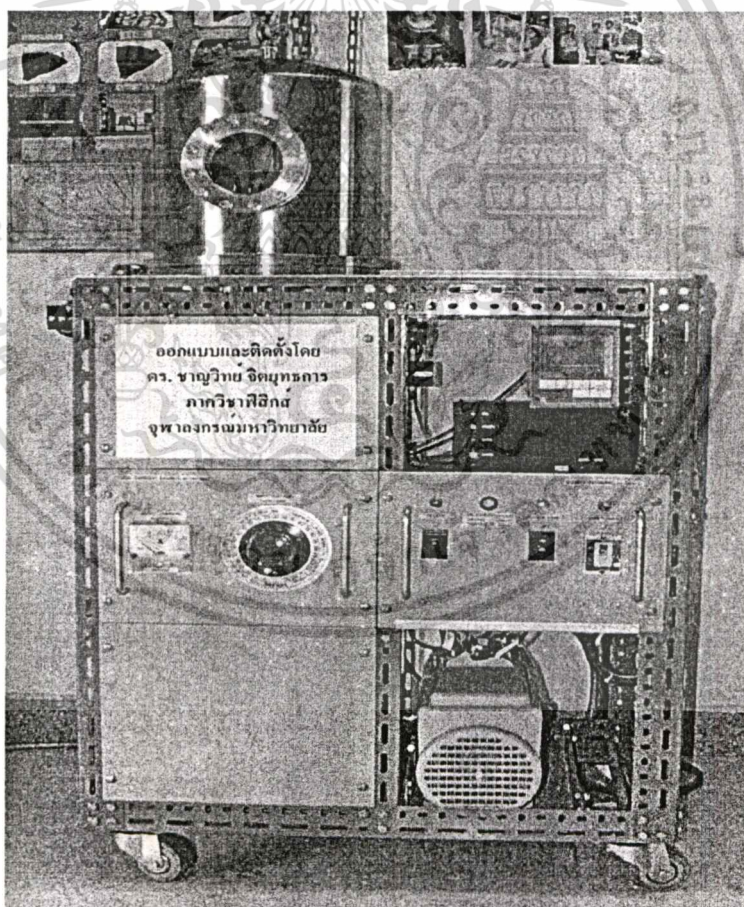


รูปที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 แสดงชุดอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

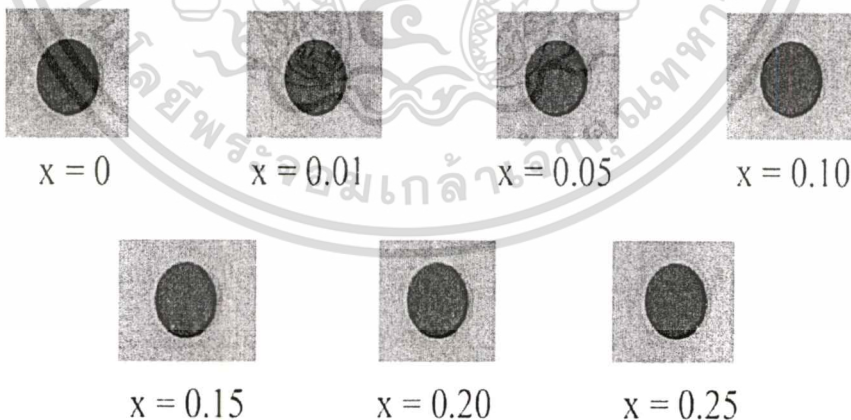
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ทั้งในรูปของเซรามิก ฟิล์มหนาและฟิล์มบาง เราได้มีการปรับปรุงสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำโดยมีการเจืออะตอมของแมกนีเซียมและมีการเพิ่มอะตอมของออกซิเจนเข้าไปโดยจุดประสงค์หลักแล้วคือต้องการเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าและเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากซึ่งคือโฮลนั่นเอง

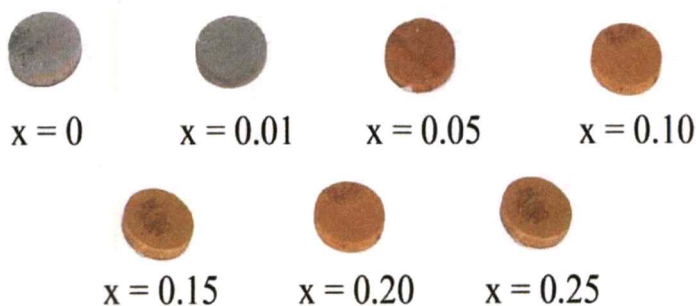
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

4.1.1 เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

เซรามิก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้จากปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีดำแต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนสีเป็นเขียวแกมฟ้าในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ และจะมีสีแดงแกมส้มในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.25$



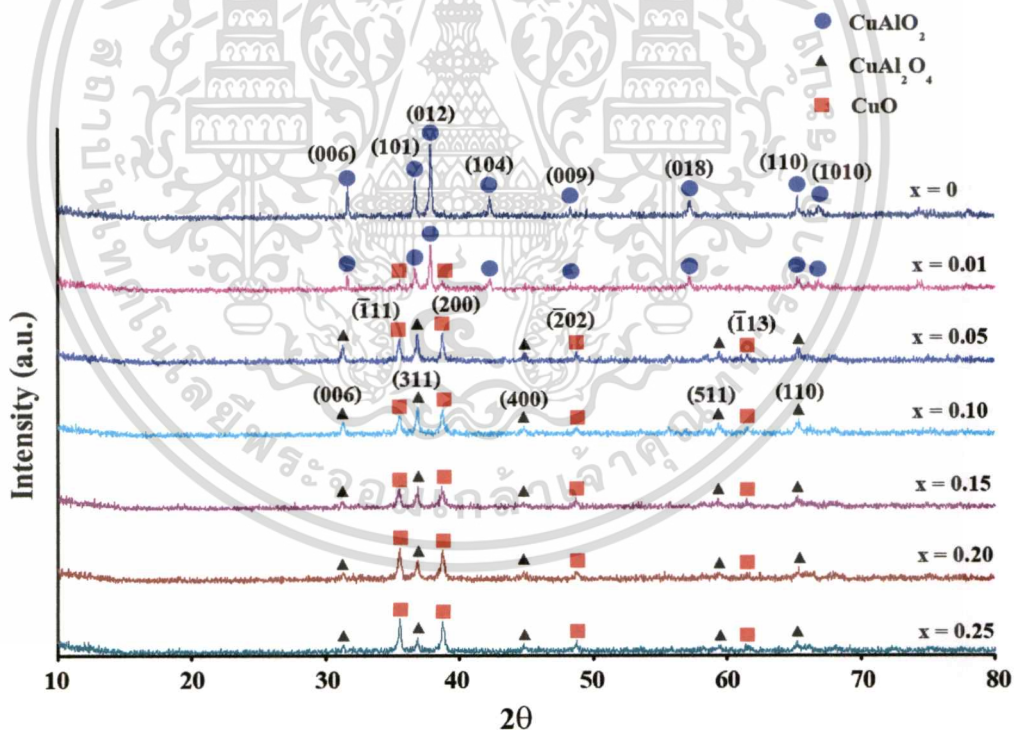
รูปที่ 4.1 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสาร CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่บดรวมกัน และนำไปอัดเป็นเม็ดผงผลึก



รูปที่ 4.2 แสดงเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดใดและมีโครงสร้างแบบใด



รูปที่ 4.3 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

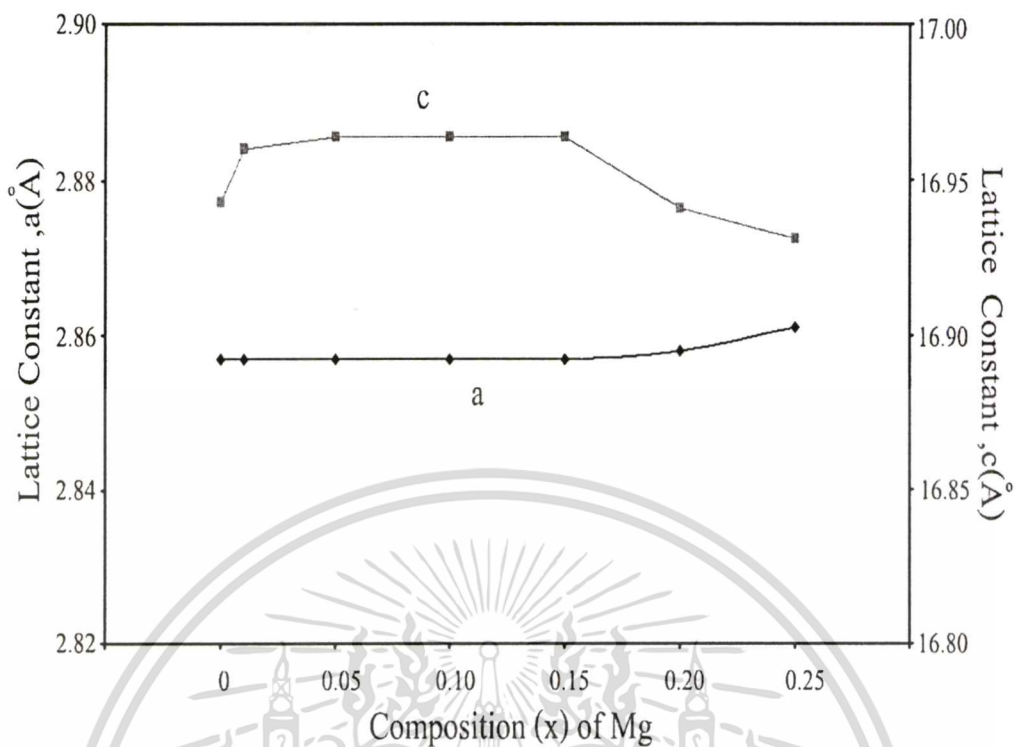
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ จะพบเฟสของ CuAlO_2 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตลาฟอสไฟท์ ชนิด $R\bar{3}m$ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (006) ที่มุม $2\theta \approx 32^\circ$ (101) ที่มุม $2\theta \approx 37^\circ$ (012) ที่มุม $2\theta \approx 38^\circ$ (104) ที่มุม $2\theta \approx 42^\circ$ (009) ที่มุม $2\theta \approx 48^\circ$ (018) ที่มุม $2\theta \approx 57^\circ$ (110) ที่มุม $2\theta \approx 65^\circ$ (1010) ที่มุม $2\theta \approx 67^\circ$ (116) ที่มุม $2\theta \approx 74^\circ$ และ (202) ที่มุม $2\theta \approx 78^\circ$ โดยที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่ $x=1$ นั้นจะเริ่มปรากฏเฟสของ CuO ขึ้น ในกรณี $0.05 \leq x \leq 0.25$ จะไม่ปรากฏเฟสของ CuAlO_2 แต่จะปรากฏเฟส CuO และ CuAl_2O_4 ขึ้นแทน แต่จะไม่พบเฟสของ MgO

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of Mg	Lattice Constant (Å)		c/a
	a	c	
0	2.857	16.943	5.930
0.01	2.857	16.960	5.936
0.05	2.857	16.964	5.938
0.10	2.857	16.964	5.938
0.15	2.857	16.964	5.938
0.20	2.858	16.941	5.928
0.25	2.861	16.931	5.918

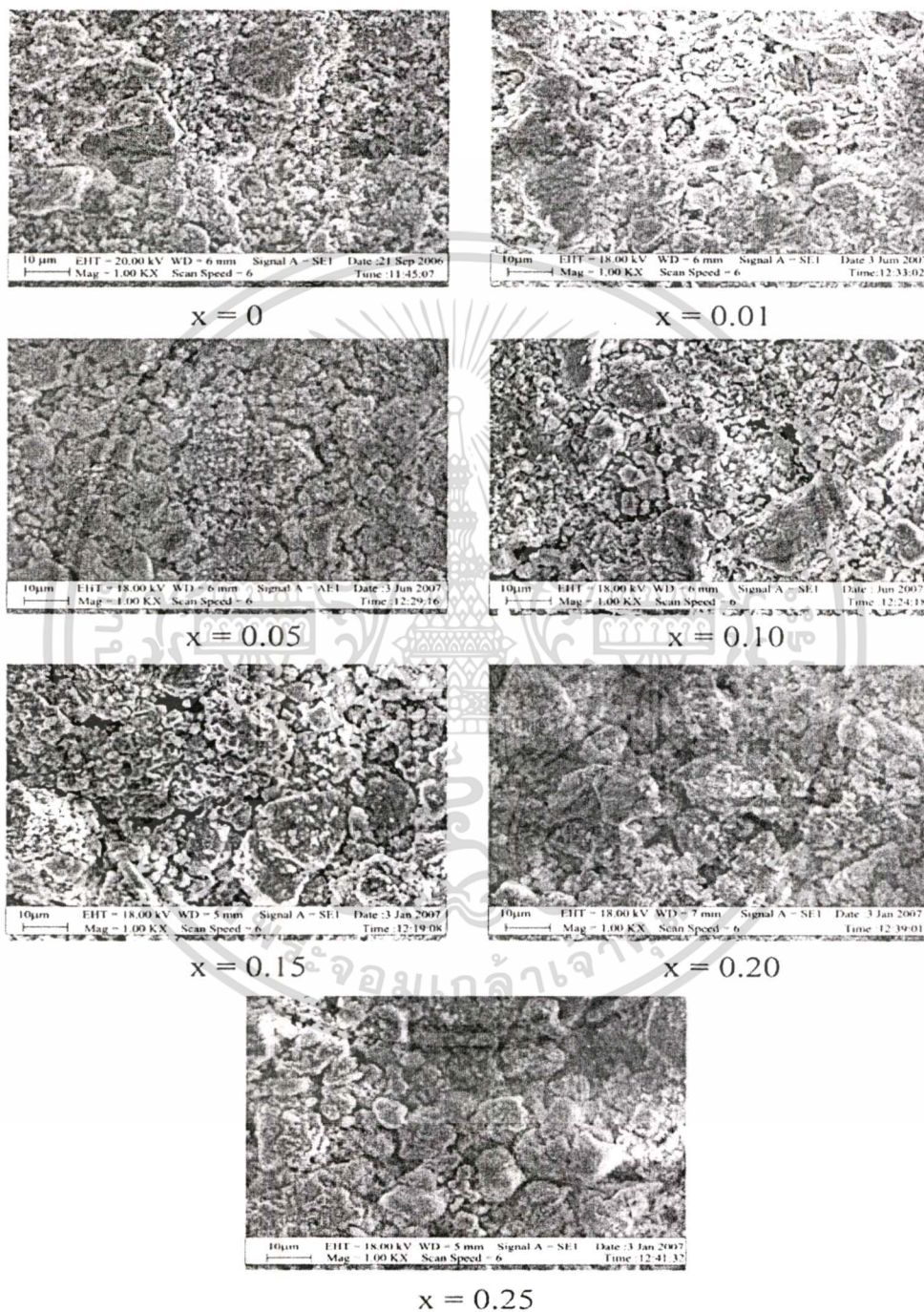
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าคงที่ของผลึก a และค่าคงที่ของผลึก c เทียบกับปริมาณอะตอม Mg โดยที่ค่าคงที่ของผลึก a ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง $0 \leq x \leq 0.15$ จะมีค่าคงที่ แต่เมื่อในช่วง $0.20 \leq x \leq 0.25$ ค่าคงที่ของผลึก a นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าคงที่ของผลึก c ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในช่วง $0.01 \leq x \leq 0.15$ ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าคงที่และต่อมาในช่วง $0.15 \leq x \leq 0.25$ ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าลดลง

4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิด เป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.5 แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

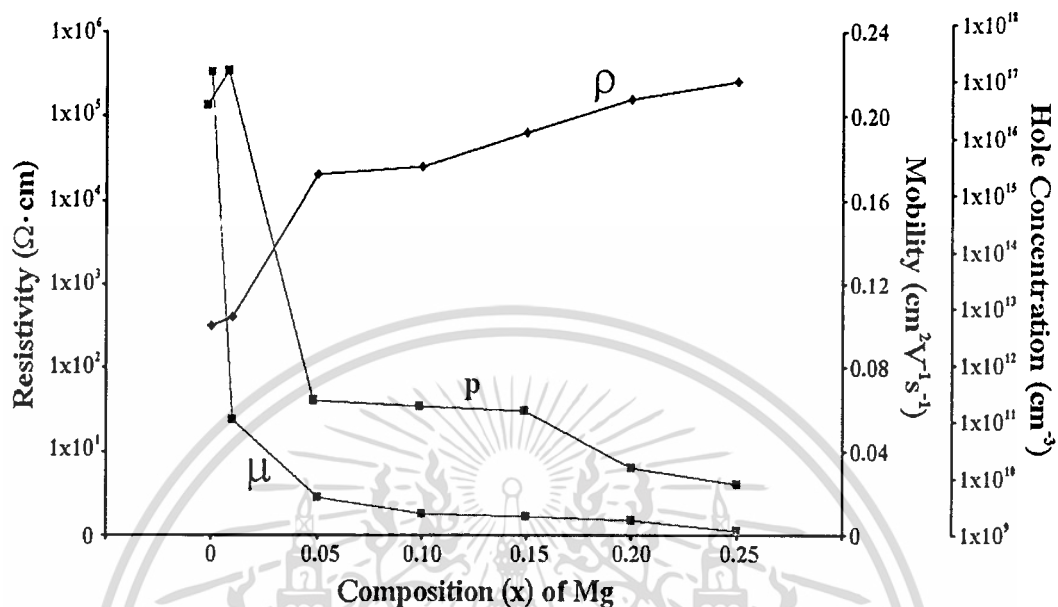
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of Mg	Relative Density (%)
0	54.71
0.01	53.61
0.05	52.45
0.10	52.38
0.15	52.36
0.20	51.32
0.25	46.54

จากรูปแสดงภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือของอะตอม Mg เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันช่องว่างระหว่างเกรนก็มีขนาดที่เพิ่มขึ้นด้วย และจากตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ลดลงตามปริมาณสารเจือ

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

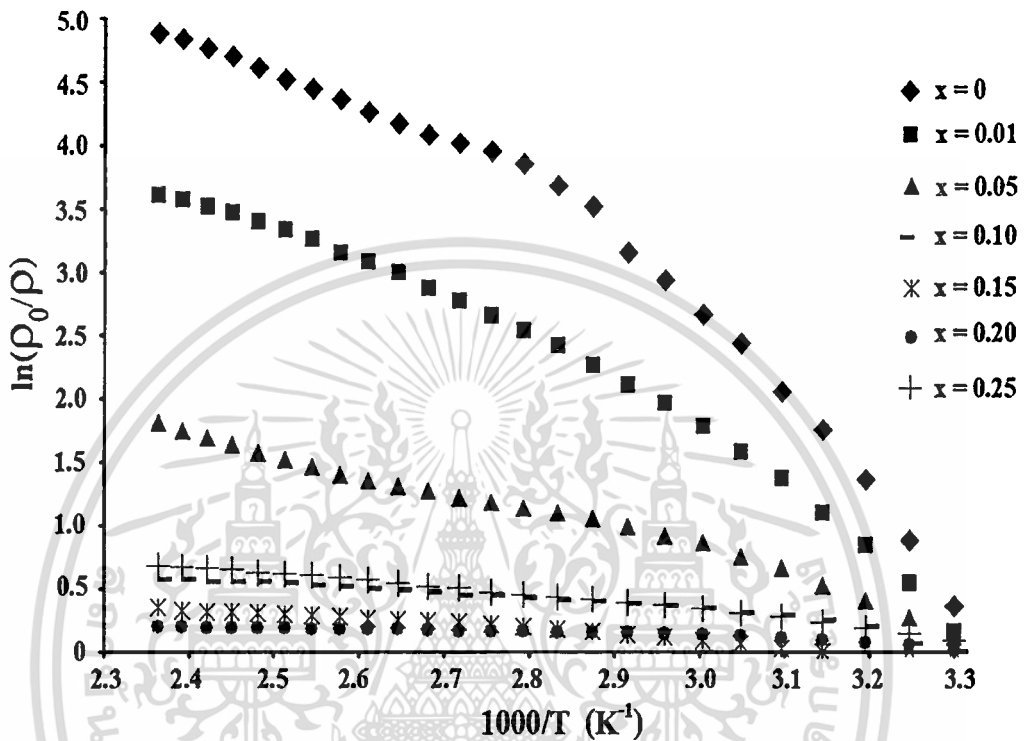


รูปที่ 4.6 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพคล่องของโฮล และความหนาแน่นของโฮลของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่องพาหะของเซรามิกของสารประกอบ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of Mg	Hole Concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)
0	6.94×10^{16}	0.221	4.07×10^2
0.01	2.08×10^{17}	0.055	5.41×10^2
0.05	2.44×10^{11}	0.018	2.61×10^4
0.10	3.31×10^{11}	0.010	3.60×10^4
0.15	4.98×10^{11}	0.009	7.11×10^4
0.20	2.31×10^{10}	0.007	1.98×10^5
0.25	9.11×10^9	0.002	3.01×10^5

จากภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ ค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสภาพคล่องมีค่าลดลง และค่าสภาพความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่ $0.01 \leq x \leq 0.25$ ค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์มีค่าลดลง ค่าสภาพคล่องมีค่าลดลง และค่าสภาพความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

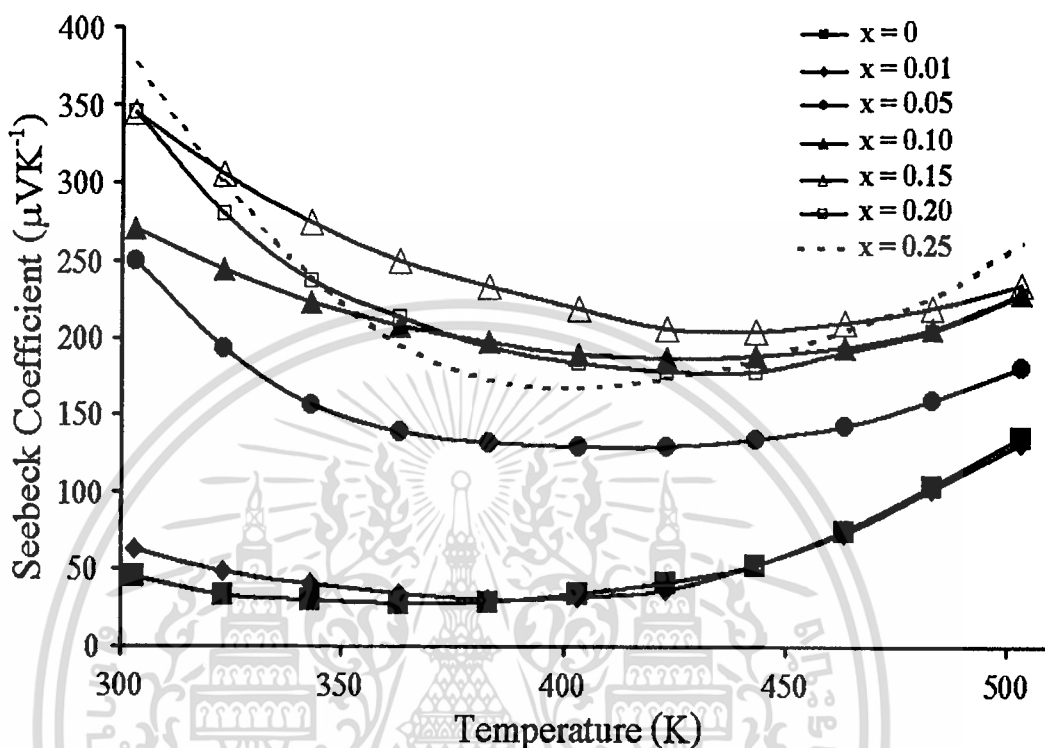
ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$)
ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงเล็ก

Composition (x) of Mg	Activation Energy (meV)		
	E_1	E_2	E_3
0.00	-	216	560
0.01	-	260	
0.05	100	192	
0.10	40	-	-
0.15	48	-	-
0.20	32	-	-
0.25	52	-	-
Poit Defect Type	O_i	V_{Cu}	V_{Al}

หมายเหตุ : รัศมีไอออน $\text{Cu}^+ = 0.95 \text{ \AA}$, $\text{Al}^{3+} = 0.53 \text{ \AA}$, $\text{O}^{2-} = 1.22 \text{ \AA}$, $\text{Mg}^{2+} = 0.72 \text{ \AA}$

จากตารางที่ 4.4 ในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่ $0 \leq x \leq 0.01$ จะเกิดระดับพลังงาน 2 ระดับคือ ระดับพลังงานของ V_{Cu} และระดับพลังงาน V_{Al} แต่เมื่อมีการเจืออะตอมของ Mg เพิ่มขึ้น นั้น ระดับพลังงานทั้งสองจะหายไป และจะเกิดระดับพลังงาน O_i ขึ้นแทน

4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



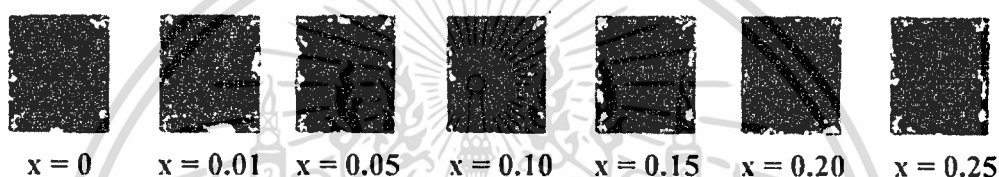
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ สัมประสิทธิ์ของซีเบกที่ปริมาณ x เท่ากับ 0 มีค่าประมาณ $150 \mu\text{V/K}$ และที่ค่า x มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกจะมีลักษณะเช่นเดียวกันคือจะมีค่าลดลงจากช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100°C และจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น

4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) โดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

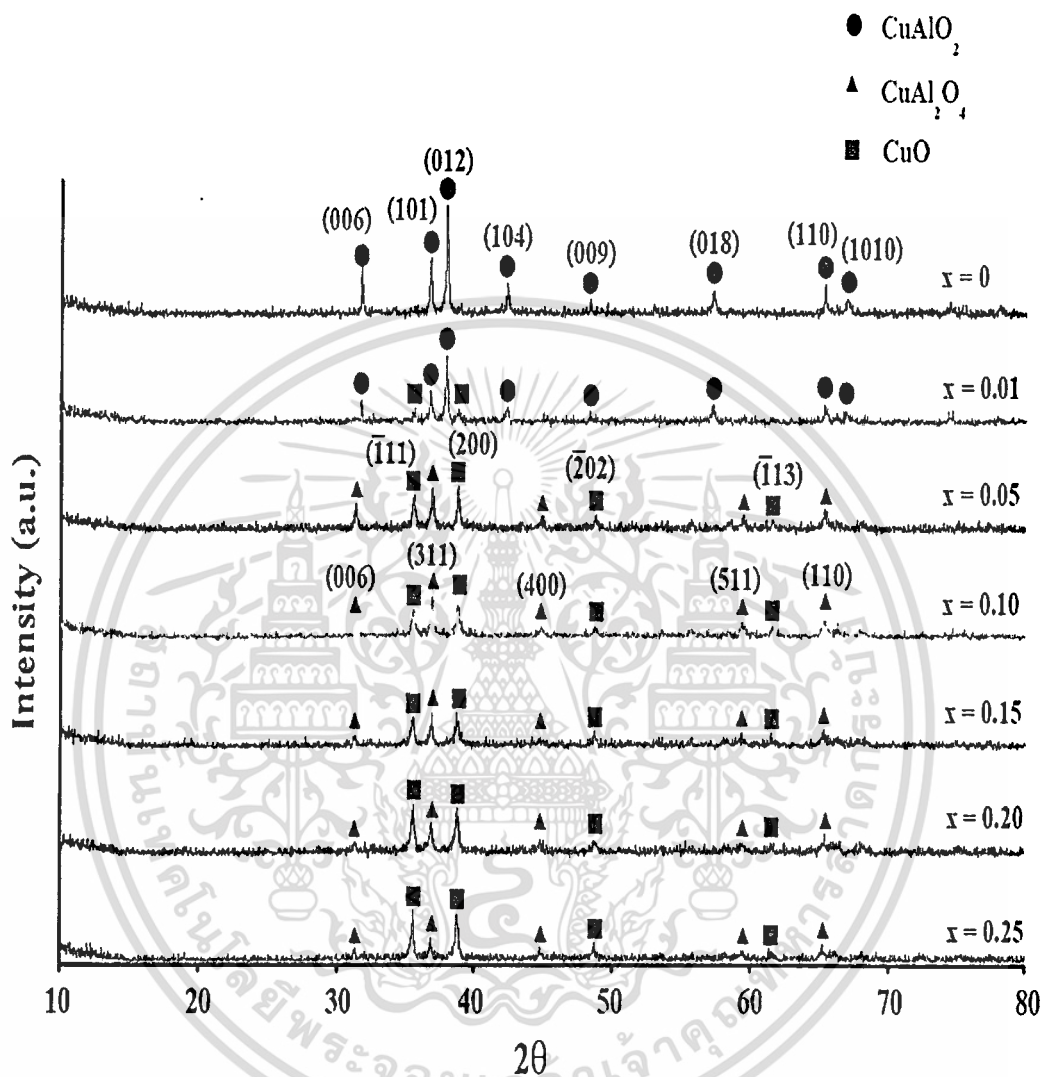
4.2.1 ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่ได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) เตรียมได้จากวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นเซรามิกที่ได้จากวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ฟิล์มที่ได้จะมีความพรุนที่สูงที่สุดที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับเซรามิกส์ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ และจะมีสีน้ำตาลดำในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.25$



รูปที่ 4.9 แสดงภาพฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยวิธีพิมพ์สกรีนบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

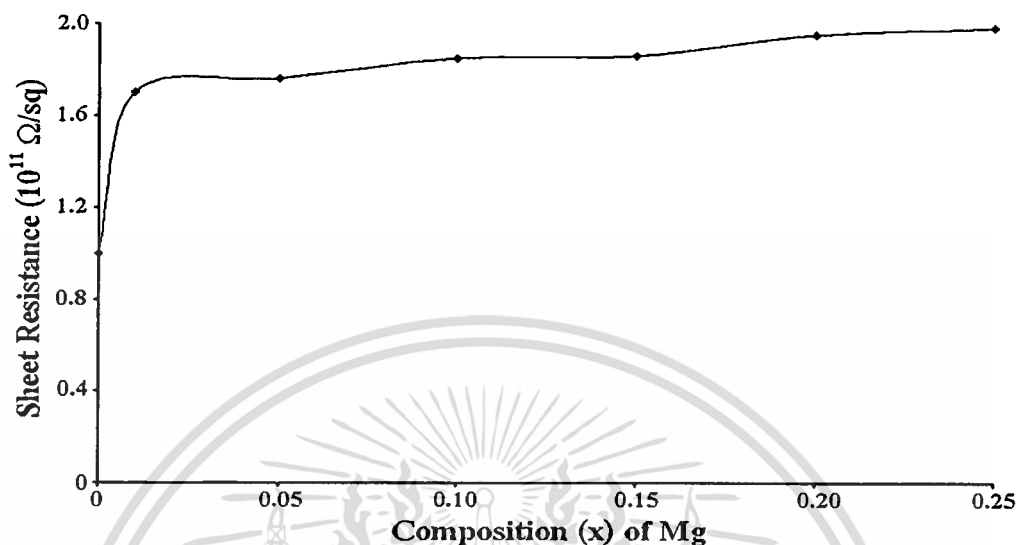
4.2.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.10 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

พิกของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มหนา $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) มีลักษณะเหมือนกับเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ คือปริมาณของอะตอม Mg ที่ x เท่ากับ 0 จะพบเฟสเดี่ยวของ CuAlO_2 และที่ x เท่ากับ 0.01 จะเริ่มพบเฟสของ CuO และ CuAl_2O_4 และที่ $0.05 \leq x \leq 0.25$ จะพบว่าเฟสของ CuO และ CuAl_2O_4 นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและเฟสของ CuAlO_2 จะหายไป

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



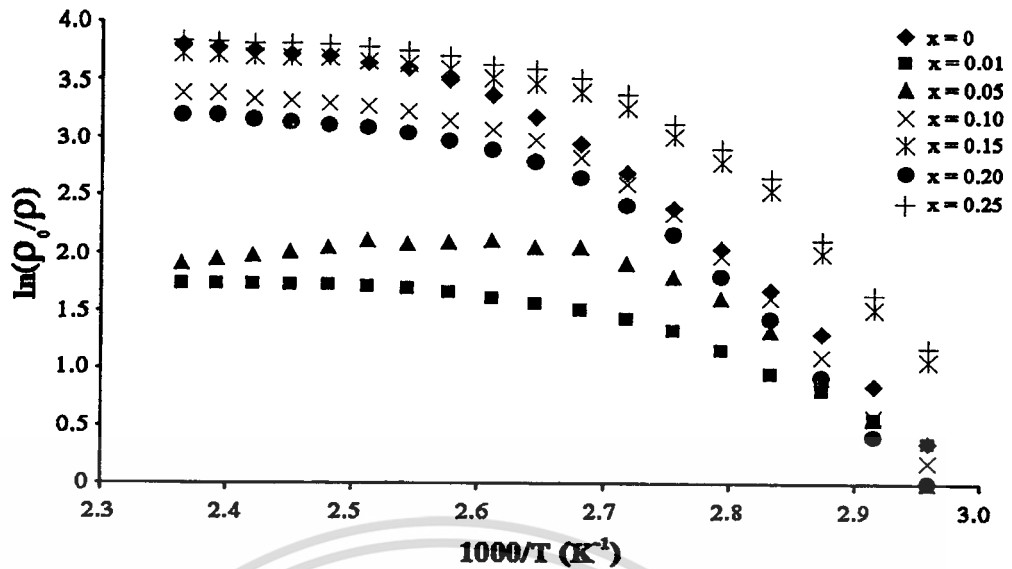
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นเมื่อเทียบกับสัดส่วนของอะตอม Mg ของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านแผ่นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition (x) of Mg	Sheet Resistance (Ω/sq)
0.00	1.04×10^{11}
0.01	1.70×10^{11}
0.05	1.76×10^{11}
0.10	1.85×10^{11}
0.15	1.86×10^{11}
0.20	1.95×10^{11}
0.25	1.98×10^{11}

จากภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.5 นั้นแสดงถึงค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มหนาที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกคือที่ปริมาณของอะตอม Mg อยู่ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ และเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ตารางที่ 4.6 แสดงพลังงานกระตุ้นของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Composition (x) of Mg	Activation Energy (meV)				
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
0	-	248	-	635	-
0.01	-	129	409	-	-
0.05	97	-	-	-	890
0.10	80	-	-	-	935
0.15	76	-	-	-	920
0.20	69	-	-	-	919
0.25	61	-	-	-	913
Point Defect Type	O_i	V_{Cu}	O_{Cu}	V_{Al}	Cu_i

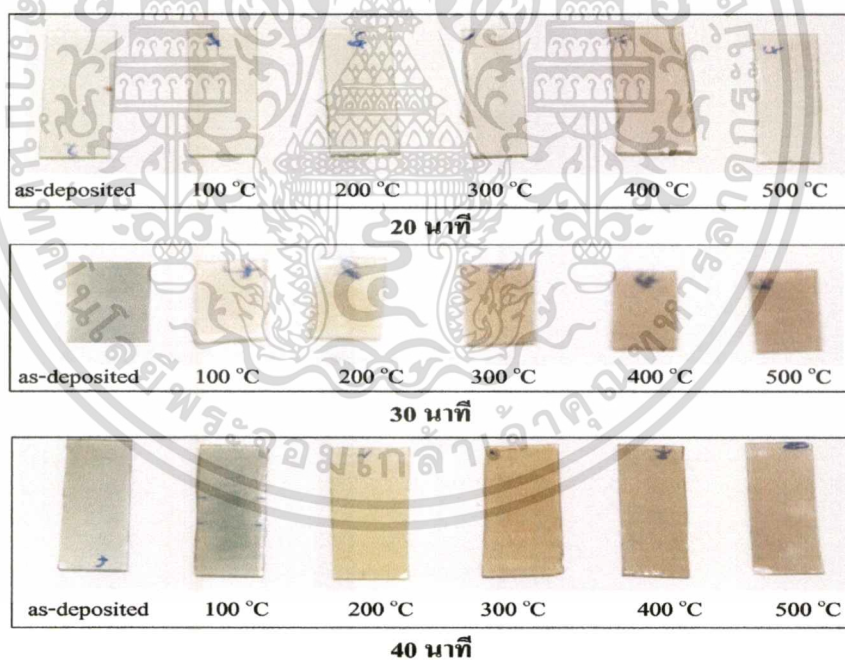
ระดับพลังงานการกระตุ้นที่พบในฟิล์มหนาในช่วงของปริมาณสารเจือเท่ากับ $0 \leq x \leq 0.01$ จะพบระดับพลังงานของ V_{Cu} และ V_{Al} แต่ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ จะพบระดับพลังงานของ O_i และ Cu_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

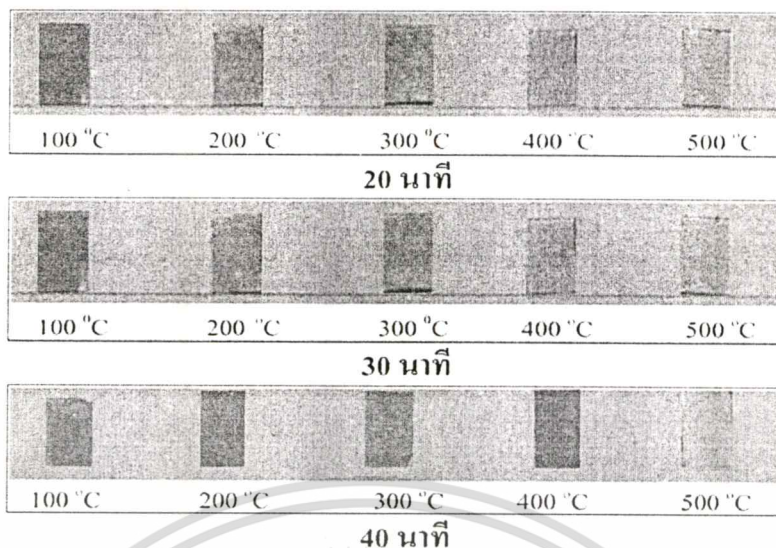
4.3 ผลการทดลองการศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

4.3.1 ผลการทดลองของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาการระเหย 20, 30 และ 40 นาที และ ได้มีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ในบรรยากาศของอากาศและแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จะมีลักษณะใส ในช่วง as-deposited และ ที่ช่วงอุณหภูมิการแอนนีสเท่ากับ 100 °C ฟิล์มบางจะมีสีเขียวเข้ม ที่ช่วงอุณหภูมิการแอนนีส 200 °C สีจะมีลักษณะเป็นสีเขียวอ่อน และจะเป็นสีน้ำตาลเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสมีค่าตั้งแต่ 300 °C ขึ้นไป ยกเว้นในกรณีที่แอนนีสในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิการแอนนีสที่ 500 °C สีของฟิล์มบางจะมีสีที่ใส ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



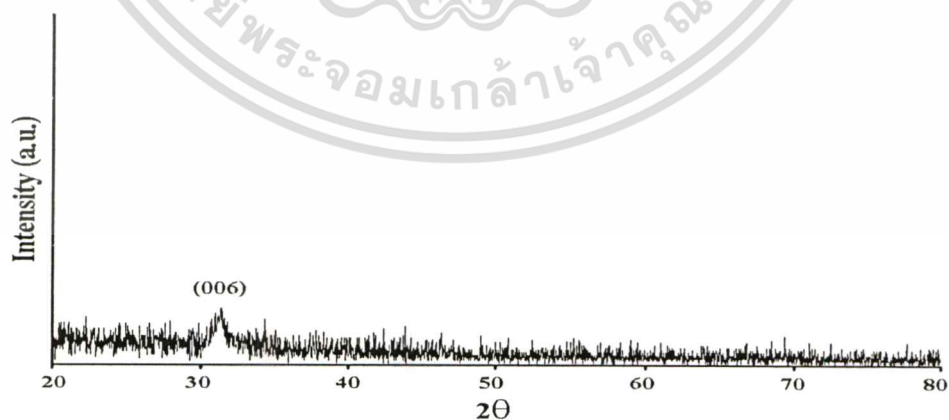
รูปที่ 4.13 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ใช้เวลาในการระเหยต่างกันและเมื่อมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ใช้เวลาในการระเหยต่างกันและเมื่อมีการแอนนัลในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

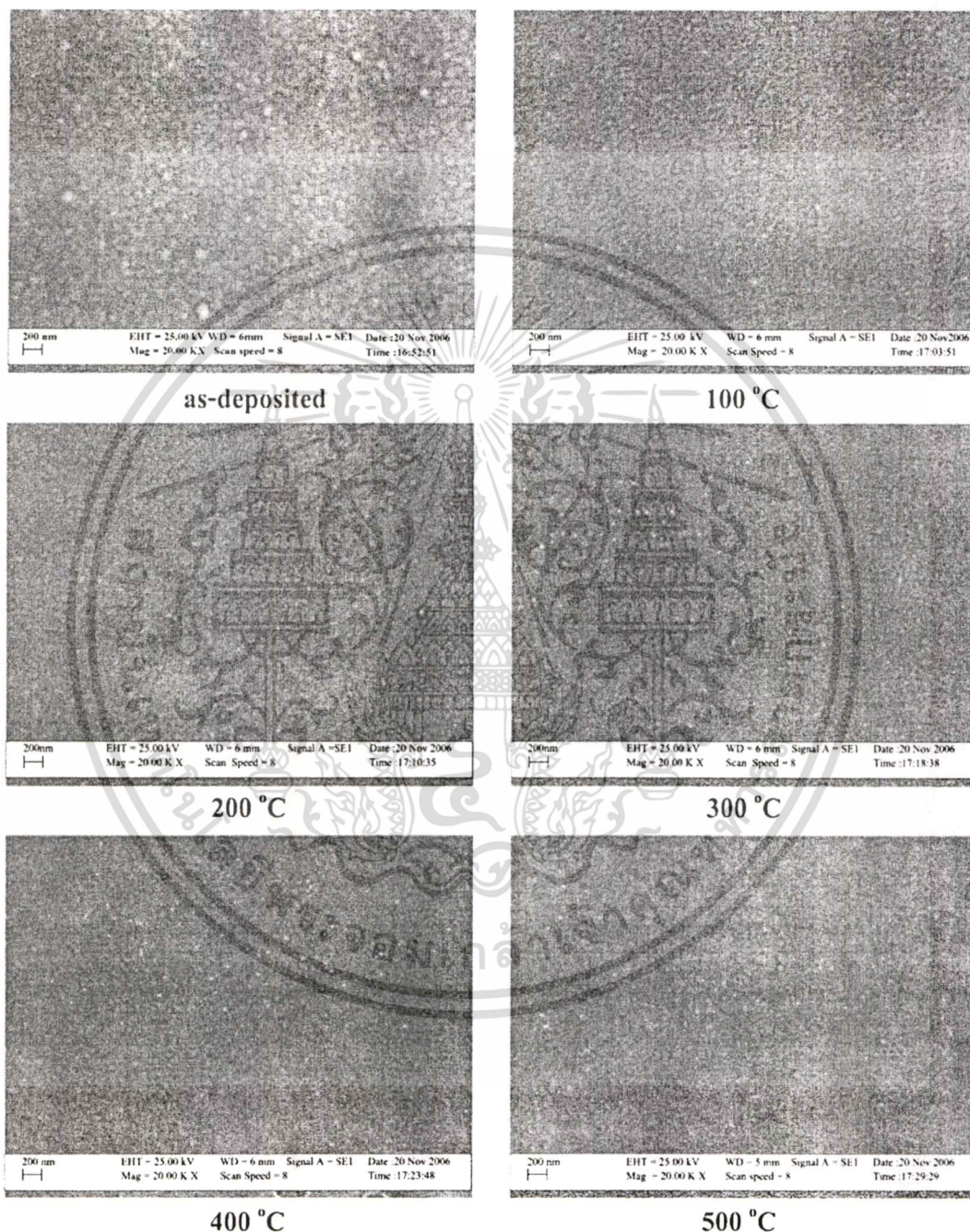
จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตลาฟอสไฟท์ ชนิด R3m โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (006) ที่มุม $2\theta \approx 32^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีจากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 80 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

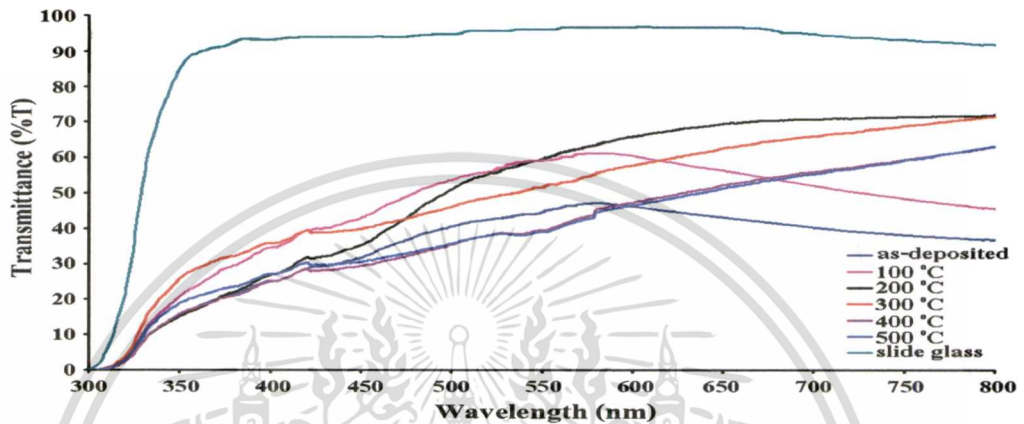


รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาในการระเหย 40 นาที และเมื่อมีการแอนนีลในอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

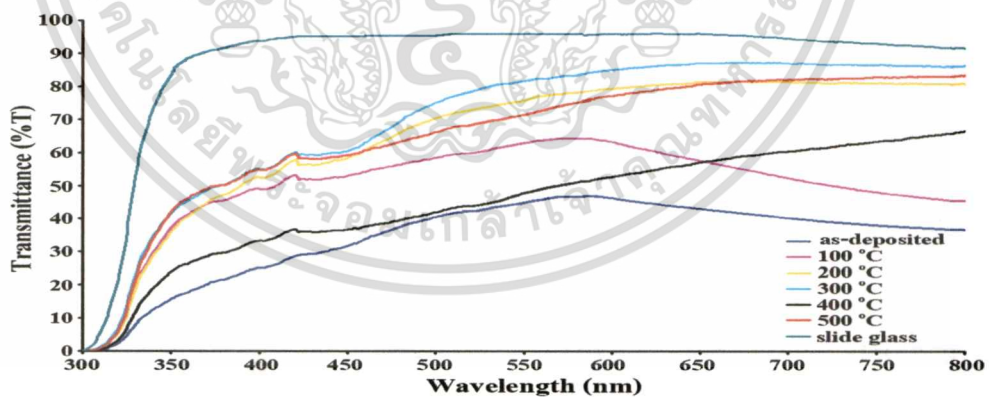
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั้นเกรนมีขนาดเล็กลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยที่ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ไม่ได้รับการแอนนีสจะมีค่าประมาณ 100 nm

4.3.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จาก การระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

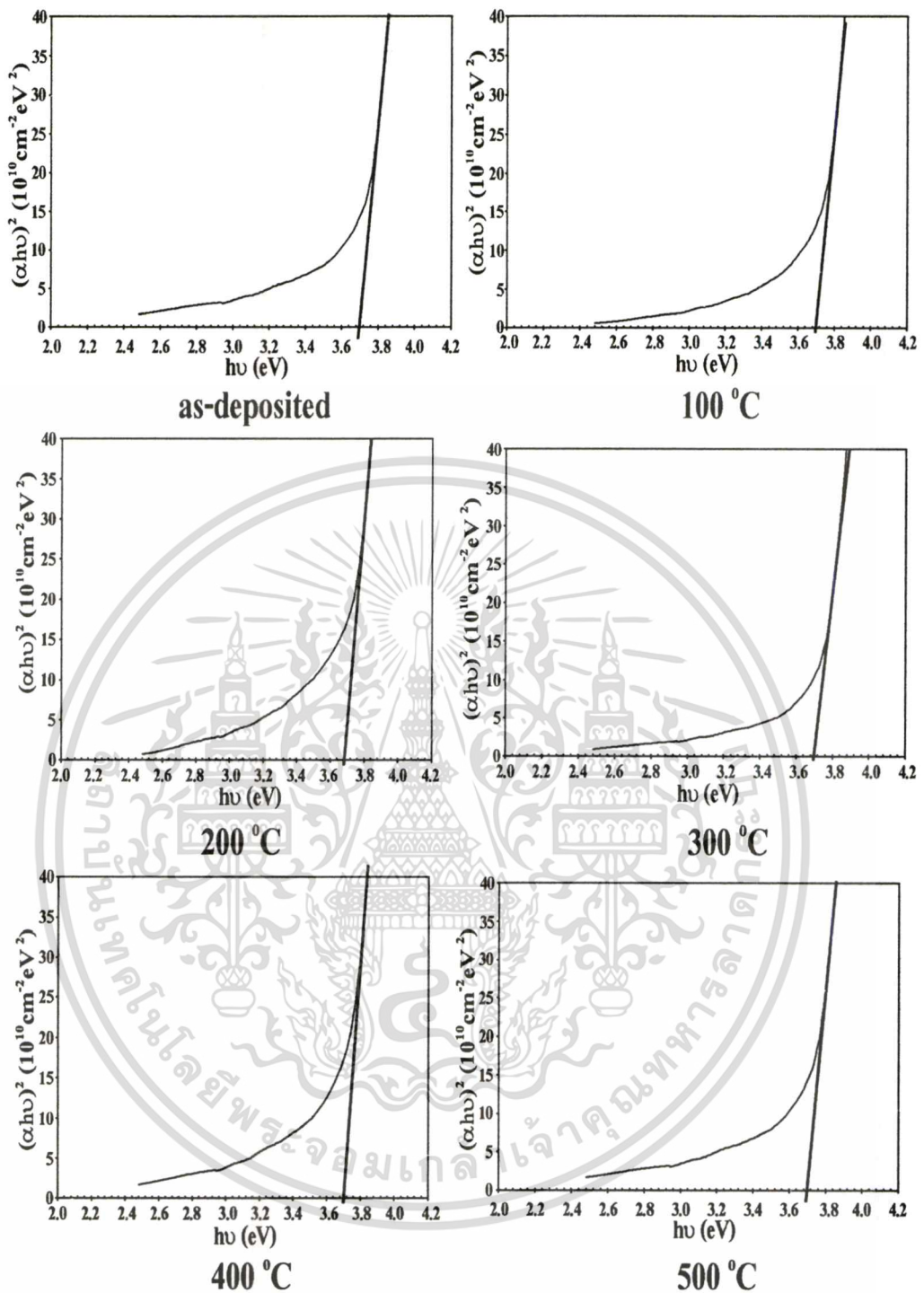


รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



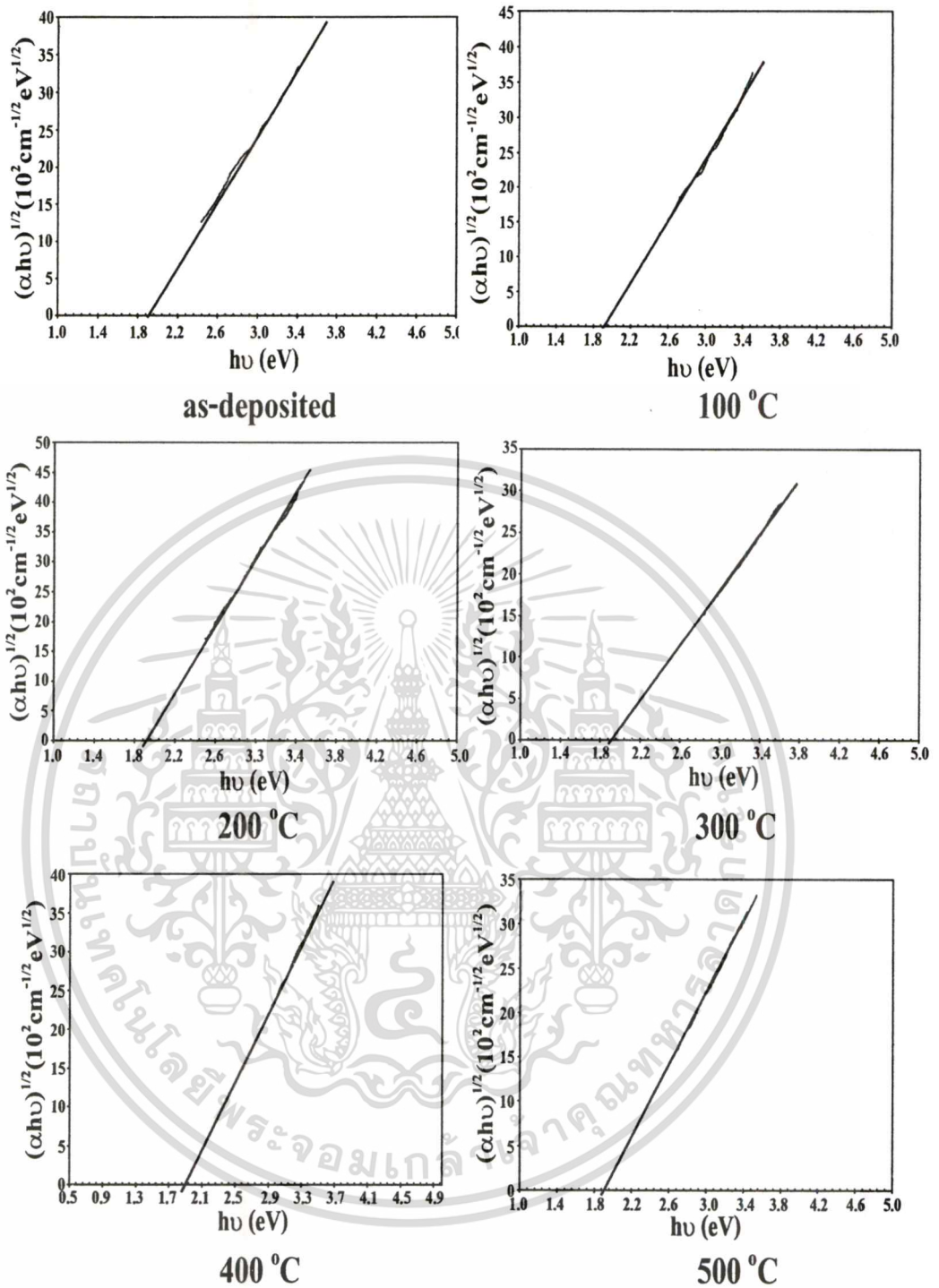
รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหย 20 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (E_{g1}) และแบบเฉียง (E_{g2}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

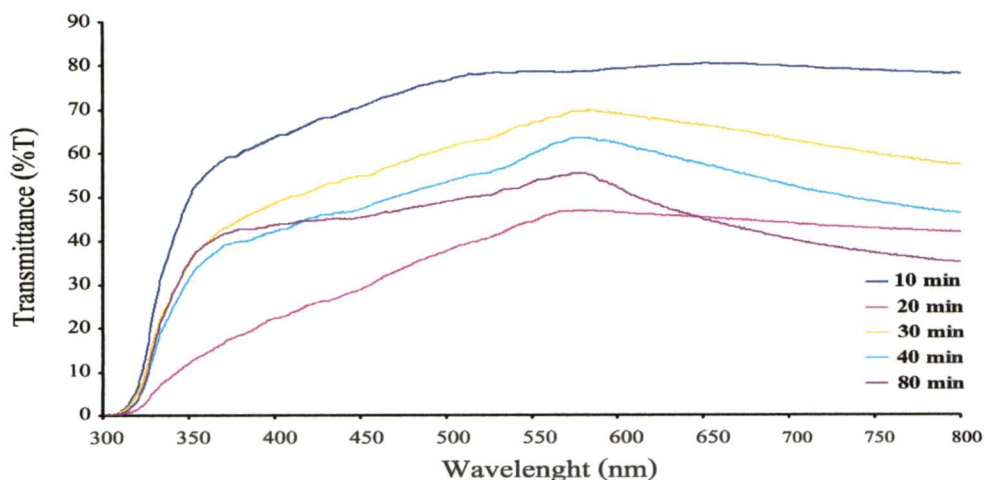
Annealing Temperature (°C)	Direct Gap (eV)	Indirect Gap (eV)
as-deposited	3.70	1.90
100	3.70	1.90
200	3.70	1.90
300	3.70	1.90
400	3.70	1.90
500	3.70	1.90

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (E_{g1}) และแบบเฉียง (E_{g2}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

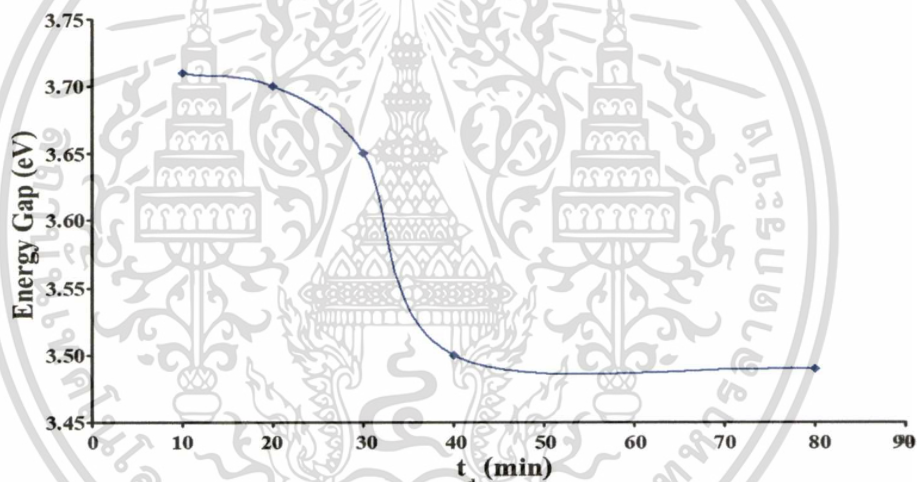
Annealing Temperature (°C)	Direct Gap (eV)	Indirect Gap (eV)
as-deposited	3.70	1.90
100	3.70	1.90
200	3.70	1.90
300	3.70	1.90
400	3.70	1.90
500	3.70	1.90

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 นั้นแสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuAlO_2 มีค่าอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นและค่าช่องว่างแถบพลังงานจากการวัดที่ได้ นั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงจะมีค่าประมาณ 3.70 eV และค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงมีค่าประมาณ 1.90 eV ในช่วงที่ยังไม่ได้มีการแอนนีส และในช่วงที่มีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100- 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยต่างกัน



รูปที่ 4.22 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงเทียบกับระยะเวลาในการระเหยสารของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยแตกต่างกัน

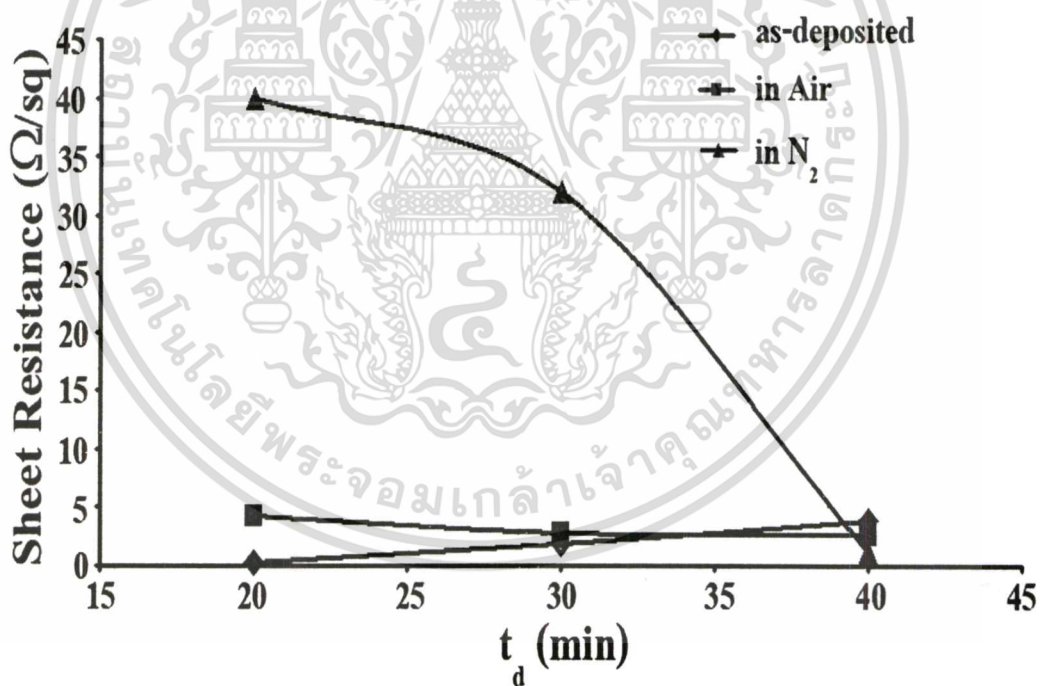
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงที่ขึ้นกับระยะเวลาในการระเหยของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ใช้ระยะเวลาในการระเหยแตกต่างกัน

Deposition Time (min)	Direct Gap (eV)	Indirect Gap (eV)
10	3.71	1.90
20	3.70	1.90
30	3.65	1.89
40	3.50	1.89
80	3.49	1.89

จากรูป 4.22 จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 จะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการระเหยสารเพิ่มขึ้น

4.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuAlO_2



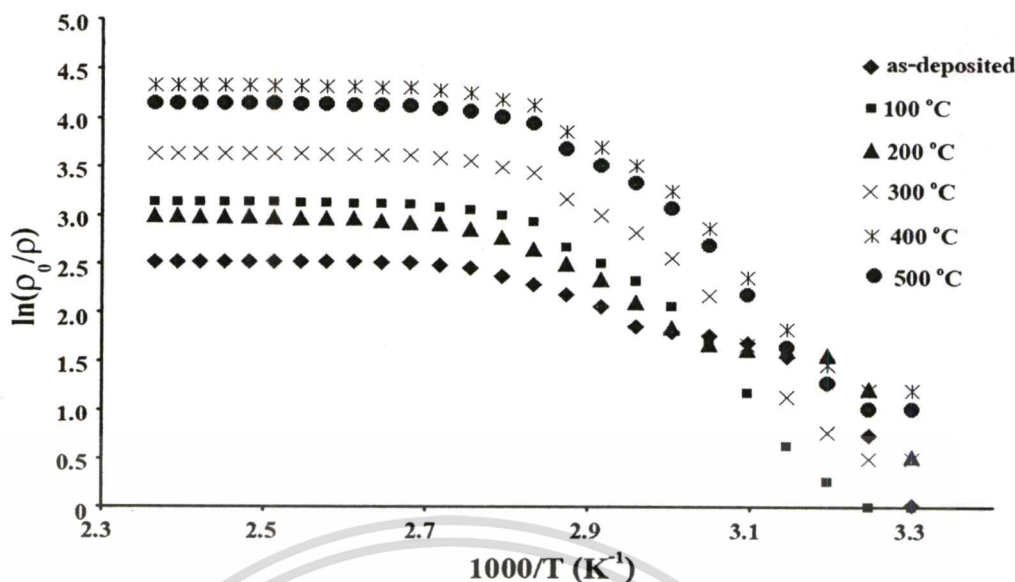
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนیلในอากาศและบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

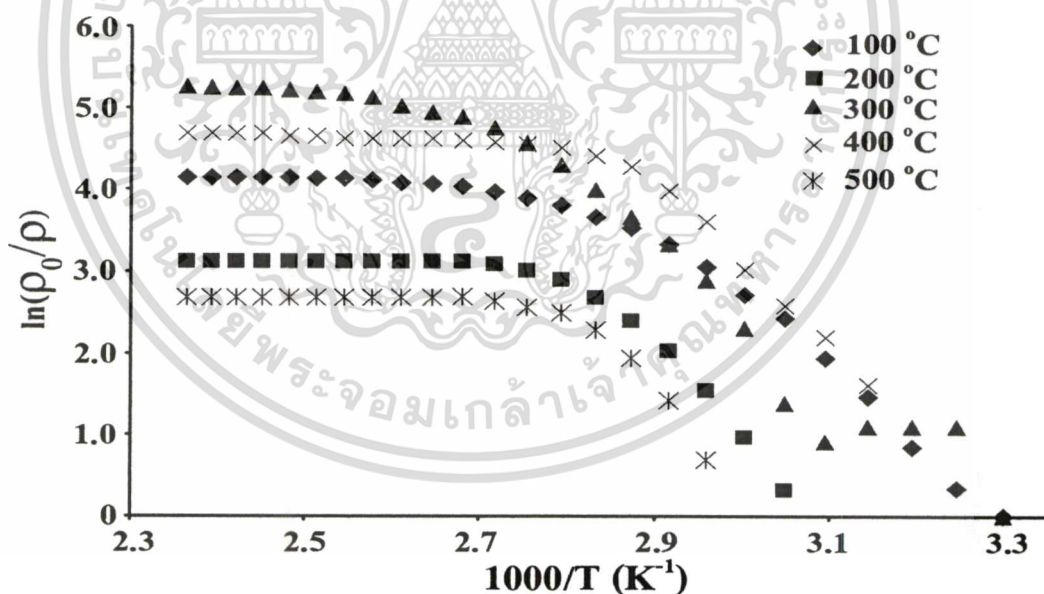
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่น (หน่วยเป็น $10^9 \Omega/\text{sq}$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยใช้เวลาในการระเหยนาน 20, 30 และ 40 นาที เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสในอากาศและในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Annealing Temperature (°C)	Preparing Films Condition					
	$t_d = 20 \text{ min}$		$t_d = 30 \text{ min}$		$t_d = 40 \text{ min}$	
	in Air	in N_2	in Air	in N_2	in Air	in N_2
as-deposited	0.21	0.21	1.83	1.83	3.84	3.84
100	176.11	55.00	3.19	44.00	6.31	12.30
200	4.31	4.30	2.31	4.10	2.15	1.98
300	9.21	53.30	12.90	5.96	3.03	2.91
400	2.22	32.50	3.34	3.01	2.36	3.51
500	4.32	40.00	2.84	32.6	2.70	1.21

จากตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 เมื่อไม่มีการแอนนีสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการระเหยเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ความหนาเปลี่ยนไปมีค่าลดลง และการแอนนีสในอากาศค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 จะมีค่าน้อยกว่าการแอนนีสในบรรยากาศของไนโตรเจน



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาในการระเหยสารนาน 20 นาที และมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ระยะเวลาในการระเหยสารนาน 20 นาที และมีการแอนนیلในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 100-500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (หน่วยเป็น meV) ของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศใช้เวลานานในการระเหย สารนาน 20, 30 และ 40 นาที และแอนนิงในอากาศและในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Annealing Temperature (°C)		$T_d = 20 \text{ min}$							$T_d = 30 \text{ min}$							$T_d = 40 \text{ min}$													
		in Air			in N_2				in Air			in N_2				in Air			in N_2										
E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7		
62	262	364	-	-	-	-	92	262	364	-	-	-	-	270	-	-	-	270	-	-	-	387	-	-	1307	-	-	1307	
-	-	407	-	793	-	-	-	141	-	697	-	-	-	36	-	490	-	-	213	-	-	-	-	-	-	144	-	640	
46	-	404	-	-	-	-	-	360	-	1317	-	60	-	198	-	-	857	-	-	-	-	-	-	32	163	-	-	-	
-	-	402	-	856	-	-	-	-	-	842	-	127	-	74	-	-	1226	-	35	197	-	-	-	-	52	-	392	-	
125	-	-	-	834	-	-	-	251	-	888	-	41	191	-	-	-	2035	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
110	-	-	645	-	-	-	-	-	-	906	-	135	-	277	-	-	1355	-	30	-	-	-	-	-	-	-	302	-	931

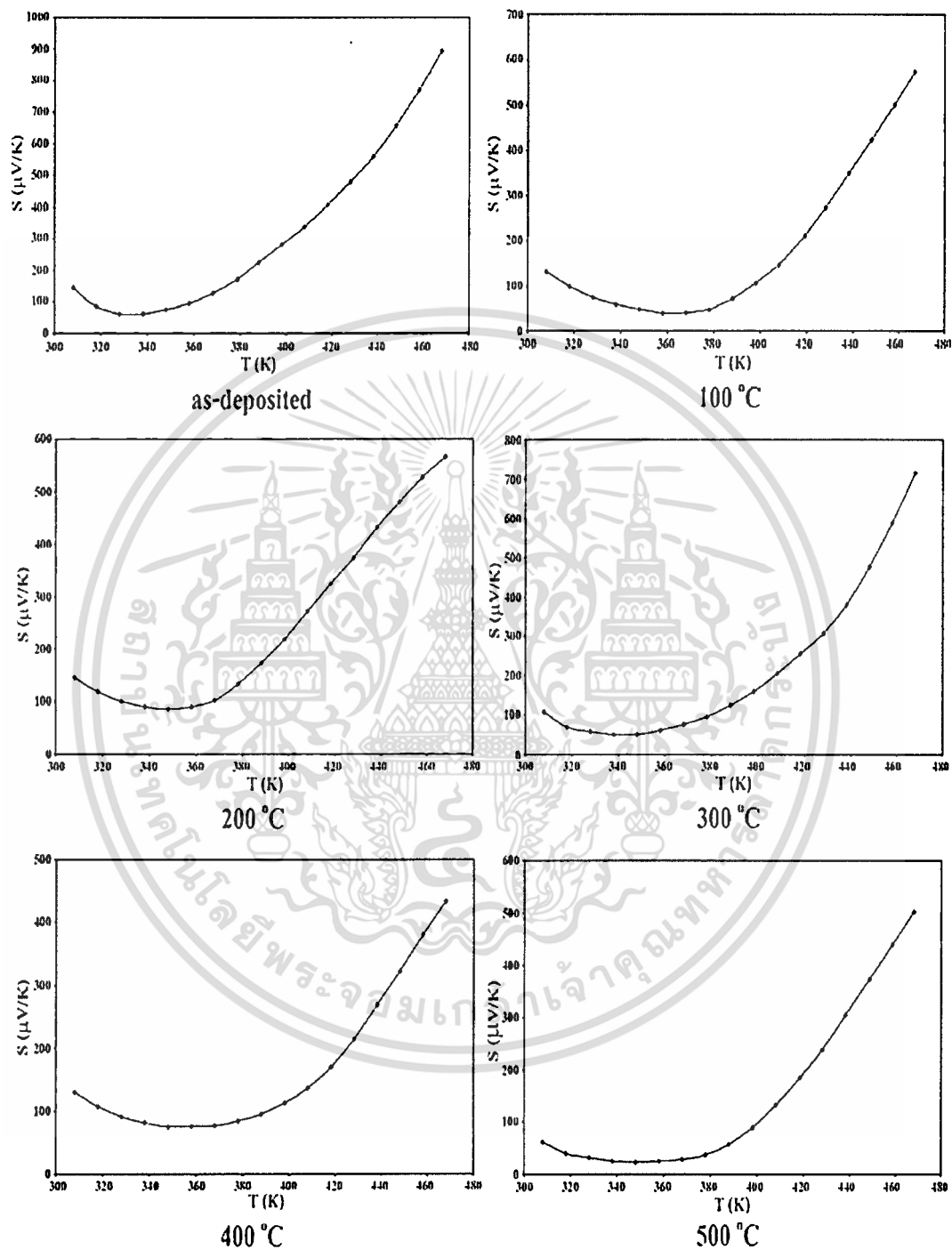
หมายเหตุ : $E_1 = O, E_2 = V, E_3 = O, E_4 = V, E_5 = Cu, E_6 = V, E_7 = Cu$
 $E_1 = O, E_2 = V, E_3 = O, E_4 = V, E_5 = Al, E_6 = V, E_7 = Cu$

ตารางที่ 4.12 แสดงชนิดของระดับพลังงานและสาเหตุของข้อบกพร่องผลึกในฟิล์มบางของสาร
กึ่งตัวนำ CuAlO_2

Energy Level	Energy Level Type	Original of Defect	Ref.
E_1	acceptor	O_i	3, 48-49
E_2	acceptor	V_{Cu}	3, 48-49
E_3	acceptor	O_{Cu}	50-51
E_4	acceptor	V_{Al}	49-51
E_5	donor	Cu_i	50-51
E_6	donor	V_{O}	50-51
E_7	donor	Cu_0	50-51

จากตารางที่ 4.11 แสดงถึงค่าพลังงานการกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่มีการแอนนีกในอากาศนั้นจะมีระดับพลังงานกระตุ้นที่สูงกว่าการแอนนีกในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนซึ่งระดับพลังงานที่มีค่าต่ำนั้นจะเป็นระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ ในส่วนของระดับพลังงานที่ค่าสูงนั้นจะเป็นระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้

4.3.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของฟิล์มบาง CuAlO_2



รูปที่ 4.26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยใช้ระยะเวลาในการระเหย 80 นาที ที่ไม่มีการแอนนีกและมีการแอนนีกในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยใช้เวลาการระเหย 80 นาที ที่ไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกที่อุณหภูมิห้องมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 120 $\mu\text{V/K}$ โดยที่มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกเช่นเดียวกันคือมีแนวโน้มลดลงจากที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 100 °C และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหลังจากอุณหภูมิประมาณ 100 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นเตรียมสารตัวอย่างทั้งในแบบเซรามิกฟิล์มหนา และฟิล์มบาง จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง อีกทั้งยังได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัยของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้เป็นเฟสเดียวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ สเปซกรุ๊ป $R\bar{3}m$ หน่วยเซลล์เป็นแบบเฮกซะโกนัลที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c เท่ากับ 2.857 และ 16.943 Å ซึ่งสอดคล้องกับไฟล์ JCPDS No.35-1401 แต่สำหรับเซรามิก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่มีการเจืออะตอม Mg เข้าไปในโครงสร้างผลึกของ CuAlO_2 พบว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.05 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่วนค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน a ก่อนข้างคงที่ แสดงว่าไอออน Mg^{2+} ได้เริ่มเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ ซึ่งโครงสร้างผลึก CuAlO_2 มักจะมี V_{Cu} ปรากฏอยู่เสมอ [4] โดยที่ Mg ไม่ได้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} เนื่องจากรัศมีไอออน Mg^{2+} (เท่ากับ 0.72 Å) มีขนาดใกล้เคียงกับรัศมีของ Cu^+ (เท่ากับ 0.95 Å) มากกว่ารัศมีของ Al^{3+} (เท่ากับ 0.535 Å) ซึ่งปรากฏการณ์ที่ Mg^{2+} เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ นี้ Stauber และเพื่อนร่วมงาน [55] ได้รายงานไว้ในฟิล์มบางของ $\text{CuAlO}_2:\text{Mg}$ ก่อนหน้านี้แล้ว

สำหรับ $0 \leq x \leq 0.15$ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c และ แกน a มีค่าเกือบคงที่แต่ที่ผลการเลี้ยวเบนของเฟส CuO และ CuAl_2O_4 เริ่มปรากฏขึ้นแสดงว่าปริมาณ Mg^{2+} สามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ เมื่อ x ไม่เกิน 0.05 แต่เมื่อ $x \geq 0.15$ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c มีแนวโน้มลดลงแต่ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน a มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า Mg^{2+} สามารถที่จะเข้าไปในตำแหน่งของ Al^{3+} ได้บ้าง แต่ทว่าปริมาณของเฟส CuO และ CuAl_2O_4 มีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จากโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ ชั้นของคัมเบลของ O-Cu-O จะวางตัวอยู่ในแนวแกน c ส่วนชั้นของออกตะฮีดรัล AlO_6 ที่มีขอบเชื่อมติดกัน (edge-sharing octahedral) จะขนานกับระนาบ ab โดยที่ชั้นของคัมเบล O-Cu-O กับชั้นของออกตะฮีดรัลจะวางตัวในลักษณะสลับชั้นกันตามแนวแกน c ได้ 2 แบบ คือแบบ AaBbAaBb ซึ่งเรียกว่าชนิด 2H (2H polytype) กับแบบ AaBbCcAaBbCc ซึ่งเรียกว่าชนิด 3R (3R polytype) การที่ Mg^{2+} เข้าไปแทนที่ใน V_{Cu} จะทำให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c มีค่าเพิ่มขึ้น แต่

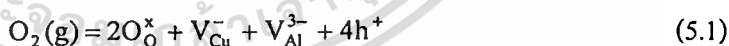
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปริมาณของ Mg^{2+} เพิ่มขึ้นถึง $x=0.15$ แล้ว Mg^{2+} จะเริ่มเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} ได้บ้างจึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึกแกน a มีค่าเพิ่มขึ้นบ้าง เนื่องจากชั้นของออกไซด์คริสตัล AlO_6 วางตัวอยู่ในระนาบ ab แต่หน่วยเซลล์ของ $CuAlO_2$ เป็นระบบบอโรนโบไซด์คริสตัล ดังนั้น $a=b$ และรัศมีของ Mg^{2+} ใหญ่กว่ารัศมีของ Al^{3+} มากเมื่อ Mg^{2+} แทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} จึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึกแกน a มีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นในลักษณะที่แต่ละเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้นแต่ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกจะมีค่าลดลง แสดงว่าเซรามิกมีรูพรุนมากเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิก $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) เมื่อปริมาณสารเจือ Mg^{2+} เพิ่มขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจากปรากฏการณ์ฮอลล์พบว่าเมื่อ x เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่องพาหะมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารเจือ Mg^{2+} ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลลดลง

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ สภาพนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเคมีของอะตอมที่ต่างไปจากกรณีอุดมคติหรือที่เรียกว่า นอนสโตยคิโอเมตรี (nonstoichiometry) ซึ่งจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องชนิดจุด (point defects) ในหลาย ๆ แบบ เช่น อะตอมโลหะของโครงผลึกขาดหายไป (metal deficit) และการเติมอะตอมออกซิเจนส่วนเกินเข้าไปในโครงผลึกซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า อินเตอร์คัลเลชัน (intercalation) หรือกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งข้อบกพร่องทั้ง 2 แบบดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนส่วนเกินในโครงผลึก ในกรณีที่มีอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากแวนแคนซีของ Cu และ Al จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์ [52]



เมื่อ O_O^\times , V_{Cu}^- , V_{Al}^{3-} และ h^+ คืออะตอมของออกซิเจน แวนแคนซีของ Cu แวนแคนซีของ Al และ โฮลตามลำดับ

ส่วนกรณีที่มีอะตอมออกซิเจนส่วนเกินโดยกระบวนการอินเตอร์คัลเลชันอะตอมออกซิเจนดังกล่าวจะปรากฏแทรกอยู่ระหว่างโครงผลึก (O_i^{2-}) ดังความสัมพันธ์ [56]



จากการเจือ Mg^{2+} ลงในตำแหน่งของ Cu^+ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลลดลงแสดงว่าการเจือ Mg^{2+} ลงในตำแหน่งของ Cu^+ ประพฤติตัวเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน (donor) ซึ่งจะหักล้างกับปริมาณที่มีอยู่จึงทำให้ปริมาณโฮลสุทธิลดลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังความสัมพันธ์



เมื่อ Mg_{Cu}^+ คือ ไอออน Mg^{2+} ซึ่งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ ประจุสุทธิจึงเป็น +1 และ Mg_{Cu}^+ (ซึ่งประพฤติตัวเสมือนเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน) จะเหนี่ยวนำให้เกิด O_i^{2-} จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณสารเจือ (x) ของ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ มากกว่า 0.05 ขึ้นไปค่าพลังงานกระตุ้นของทุก ๆ สารตัวอย่างจะมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้เกิดจาก O_i^{2-} ซึ่งประพฤติตัวเหมือนเป็นผู้รับอิเล็กตรอน

สำหรับกรณีที่มีปริมาณสารเจือ (x) ≤ 0.05 ระดับพลังงานกระตุ้น E_2 และ E_3 น่าจะสอดคล้องกับข้อบกพร่องผลึกชนิด V_{Cu}^- และ V_{Al}^{3+} ตามลำดับ แต่ O_i^{2-} ไม่ปรากฏใน $CuAlO_2$ เนื่องจากระยะห่างระหว่าง Cu^+ จำนวน 3 ไอออนที่ติดต่อกันแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าเท่ากับ 2.86 \AA ซึ่งค่อนข้างสั้นกว่า $Cu-Cu$ (3.02 \AA) ในสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และรัศมีของ Al^{3+} ก็มีขนาดเล็กเกินไป ดังนั้นจึงไม่มีที่ว่างมากพอที่จะทำให้เกิด O_i^{2-} ในชั้นของคัมเบล $O-Cu^+-O$ ได้ [57]

เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAlO_2$ ซึ่งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าและความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $4.07 \times 10^2 \Omega \cdot cm$ และ $6.94 \times 10^{16} \text{ c m}^{-3}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่รายงานโดย คาวาซุเอะ (Kawazoe) และเพื่อนร่วมงาน [4] ส่วนสภาพคล่องพาหะมีค่าเท่ากับ $0.221 \text{ cm}^2/Vs$ ซึ่งใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Marquardt และเพื่อนร่วมงาน [56] แต่เมื่อปริมาณสารเจือ x เพิ่มขึ้นช่องว่างระหว่างเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีเฟส CuO และ $CuAl_2O_4$ ปะปนอยู่ด้วยส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่วนปริมาณความหนาแน่นของโฮลและสภาพคล่องของพาหะจะลดลง

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ $CuAlO_2$ ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ $50 \mu V/K$ และจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิห้องถึง $100 \text{ }^\circ C$ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $100 \text{ }^\circ C$ สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อทำการเจือ Mg^{2+} เข้าไปในเซรามิกส์ของ $CuAlO_2$ สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ Mg^{2+} และมีค่าสูงสุดเท่ากับ $370 \mu V/K$ เมื่อปริมาณสารเจือ (x) เท่ากับ 0.25

สัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ก็มีแนวโน้มเดียวกับของเซรามิกส์ $CuAlO_2$ ที่ไม่มีการเจือ กล่าวคือที่ x ค่าใดๆ สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจากนั้นสัมประสิทธิ์ซีเบกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และอัตราการเพิ่มจะยิ่งช้าลงเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น

5.2 สรุปผลการวิจัยของฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) ที่เตรียมโดยวิธีพิมพ์สกรีนลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) เตรียมได้จากการเคลือบผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ลงบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีพิมพ์สกรีนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำไปแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าในการแอนนีสในอากาศนั้นจะช่วยให้เนื้อของฟิล์มหนาจะแน่นขึ้น มีรูพรุนเนื่องจากโพรงอากาศน้อยลงจึงสามารถนำมาตรวจวัดสมบัติต่างๆ ได้สะดวกขึ้น จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า มีลักษณะเหมือนกับผงผลึก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ กล่าวคือ เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้เป็นเฟสเดี่ยวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ ซึ่งมีสเปซกรุ๊ป $R\bar{3}m$ หนึ่งหน่วยเซลล์เป็นแบบเอกซะโกนัล สำหรับในช่วง $0 \leq x \leq 0.25$ พิกการเลี้ยวเบนของเฟส CuO กับ CuAl_2O_4 เริ่มปรากฏขึ้น แต่เมื่อ $x \geq 0.15$ ปริมาณของเฟส CuO และ CuAl_2O_4 จะเริ่มเพิ่มมากขึ้น

สภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มหนาของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ มีค่าสูงกว่าที่พบในเซรามิกเนื่องจากเนื้อของฟิล์มหนามีรูพรุนสูงกว่าเนื้อของเซรามิก จากการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มหนาในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 150°C ฟิล์มหนาของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) สอดคล้องกับเซรามิก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ กล่าวคือ ที่ $0 \leq x \leq 0.01$ จะพบระดับพลังงานเป็นไปตามสมการที่ 5.2 ซึ่งคือระดับพลังงานของ V_{Cu} , O_{Cu} , V_{Al} ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในเซรามิก โดยทั้งสามระดับพลังงานนั้นเป็นระดับพลังงานผู้รับซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดโฮล แต่เมื่อมีการเจือ Mg^{2+} เข้าไปมากขึ้นคือที่ค่า ($0 \leq x \leq 0.25$) จะเหนี่ยวนำให้เกิด O_i ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5.3) แต่ขณะเดียวกันก็มีการเกิดระดับพลังงานของ Cu_i เกิดขึ้นมาซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพความต้านทานที่มากขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานของ Cu_i จะเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และเนื่องจากฟิล์มหนา $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงเกินไปจึงไม่สามารถศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ ดังนั้นค่าความหนาแน่นของพาหะและค่าสภาพคล่องของฮอลล์จึงไม่ได้มีรายงานไว้

5.3 สรุปผลการวิจัยของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CuAlO_2 โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ CuAlO_2 บริสุทธิ์ โดยใช้ช่วงเวลาระเหยสารเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 80 นาที จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า เป็นเฟสเดี่ยวของ CuAlO_2 โดยมีพิกการเลี้ยวเบนของระนาบ (006) ปรากฏเด่นชัดที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธีดีซีสปีดเตอริงที่มีผู้รายงานไว้[58]

จากการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆนี้ สามารถนำไปคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ และพบว่าฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารในช่วงเวลา 20 นาที จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง เท่ากับ 3.70 eV และค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียงเท่ากับ 1.90 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้มีผู้รายงานไว้[58] แต่เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น (ตามระยะเวลาการระเหยสารที่เพิ่มขึ้น) ช่องว่างแถบพลังงานทั้งแบบตรงและแบบเฉียงจะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ เบนเนอร์จี (Banerjee) และเพื่อนร่วมงาน [59]

จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เตรียมได้จากการระเหยสารในช่วงเวลา 40 นาที เกรนจะมีขนาดเล็กระดับ 100 nm แต่ละเกรนมีขนาดสม่ำเสมอ และเมื่อแอนนัลในอากาศในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเกรนมีขนาดเล็กลง เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น แต่ไม่ปรากฏเฟสอื่นๆ เช่น CuO หรือ CuAl_2O_4 เกิดขึ้นแต่อย่างใด

จากการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการระเหยสารเพิ่มขึ้น แสดงว่าฟิล์มบางที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีข้อบกพร่องผลึกลดลง ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าข้อบกพร่องผลึกทั้งแบบแวนเดอวาล์วของอะตอมโลหะ ($V_{\text{Cu}}, V_{\text{Al}}^{3-}$) และอินเตอร์สติเชียลของอะตอมออกซิเจน (O_i^{2-}) เป็นตัวควบคุมพฤติกรรมนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuAlO_2 จากการแอนนัลฟิล์มบางทั้งในอากาศและในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการแอนนัลในอากาศช่วยทำให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีกว่าการแอนนัลในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ และค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางทั้งที่แอนนัลในอากาศและในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิในช่วง 25-150 °C พบว่าพลังงานกระตุ้นมีหลายค่าขึ้นกับอุณหภูมิและบรรยากาศของแก๊สที่ใช้แอนนัลรวมทั้งความหนาของฟิล์มบางที่แตกต่างกันด้วย สำหรับฟิล์มบางที่แอนนัลในอากาศจะมีจำนวนระดับพลังงานของข้อบกพร่องผลึกน้อยกว่าในฟิล์มบางที่แอนนัลในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ซึ่งระดับพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor) ที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกชนิด $O_i^{2-}, V_{\text{Cu}}, V_{\text{Al}}^{3-}$ และ O_{Cu} แต่การแอนนัลในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์จะเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องผลึกชนิด $\text{Cu}_i, V_{\text{O}}$ และ Cu_o ซึ่งประพจน์ตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ (donor) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้นี้จะสร้างอิเล็กตรอนอิสระไปหักล้างกับโฮล ส่งผลให้โฮลสุทธิมีปริมาณลดลง ดังนั้นฟิล์มบาง CuAlO_2 ที่การแอนนัลในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์จึงนำไฟฟ้าได้ลดลง (ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง)

เป็นที่น่าสังเกตว่าระดับพลังงานผู้รับหรือระดับพลังงานผู้ให้ชนิดเดียวกันแต่ปรากฏในฟิล์มบางที่มีเงื่อนไขในการเตรียมที่ต่างกัน (เช่นความหนาต่างกันแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกันและที่

แอนนิลในบรรยากาศต่างกัน) ระดับพลังงานชนิดนั้นๆ จะมีค่าต่างกันแสดงให้เห็นว่าข้อบกพร่องผลึกแต่ละชนิดในฟิล์มบางมีปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้แต่ละระดับพลังงานแผ่ขยายออก (split) อินแกรม (Ingram) และผู้ร่วมงาน [56] เสนอว่าข้อบกพร่องผลึกแต่ละชนิดอาจทับปลิงกันเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนในแบบ $(Al_{Cu}^{2+} - 2O_i^{2-})^{2-}$ ซึ่งจะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับแต่ถ้าเกิดข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนในแบบ $(Al_{Cu}^{2+} - 2O_i^{2-} - Cu_{Cu}^+)^x$ จะเป็นกลางทางไฟฟ้า

สำหรับเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) จะมีข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เป็นไปได้คือ $(2Mg_{Cu}^+ - 2O_i^{2-})^{2-}$ และจะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับ แต่จะพบเมื่อ $x=0.01$ ซึ่งความหนาแน่นของโฮลจะเพิ่มขึ้นจาก $6.94 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ เป็น $2.08 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แต่เมื่อ $x > 0.01$ ข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนชนิด $(2Mg_{Cu}^+ - O_i^{2-})^x$ อาจปรากฏขึ้นมาซึ่งจะประพุดิตัวเป็นกลางทางไฟฟ้าและส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลไม่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น O_i^{2-} อาจมีอันตรกิริยากับ Cu_{Cu}^+ กลายเป็นข้อบกพร่องของผลึกเชิงซ้อน $(Cu_{Cu}^+ - O_i^{2-})^-$ ซึ่งจะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับในเซรามิกของ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ แต่เชื่อว่าข้อบกพร่องผลึก $(Cu_{Cu}^+ - O_i^{2-})^-$ นี้จะมีอิทธิพลน้อยกว่า $(2Mg_{Cu}^+ - O_i^{2-})^x$ อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องของผลึกชนิดอื่นๆที่ปรากฏอยู่ในฟิล์มบางเช่น กับดักพาหะ (trap) และศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ (recombination center) ที่เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างเกรนมักจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วย แต่ในขั้นตอนนี้ยังไม่ทราบกลไกการนำไฟฟ้าที่แน่ชัด และเนื่องจากฟิล์มบาง $CuAlO_2$ มีความต้านทานแผ่นสูงเกินไปจึงไม่สามารถศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะและค่าสภาพคล่องของพาหะจึงไม่ได้รายงานไว้

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของฟิล์มบาง $CuAlO_2$ ที่เตรียมโดยการระเหยในช่วงเวลา 80 นาที ที่อุณหภูมิห้องมีค่า $120 \mu\text{V/K}$ แล้วแอนนิลในอากาศและในบรรยากาศปรกติที่อุณหภูมิ $100-500 \text{ }^\circ\text{C}$ และ ก็มีค่าประมาณ $120 \mu\text{V/K}$ เช่นเดียวกัน

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเจือ Mg ลงในโครงผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ไม่ช่วยให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกลดลงได้ ดังนั้นจึงควรหาสารเจืออื่นที่เหมาะสมกว่าเช่น N , Fe หรือ Ca เป็นต้น
2. การเตรียมฟิล์มหนาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ โดยวิธีพิมพ์สกรีนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 100°C แม้ว่าจะช่วยให้ทำให้ฟิล์มหนาแน่นมากขึ้นรูพรุนน้อยลงก็ตาม แต่การแอนนีสในอากาศส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นเฟส CuO และ CuAl_2O_4 จะแยกตัวออกมาจาก $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.25$) จึงไม่ช่วยให้การนำไฟฟ้าของเซรามิกดีขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้สารตั้งต้นที่เป็นเกลือของโลหะเช่น $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Al}[\text{OCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3]_3$ เป็นต้น และทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 100°C
3. ควรมีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เพื่อตรวจสอบว่ากลไกการนำไฟฟ้าของพาหะในสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ เป็นชนิดของพาหะที่กระโดดในระยะที่ไม่คงที่ (variable range hopping type) ซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับอินเตอร์สติเชียลของอะตอมออกซิเจน
4. การเตรียมฟิล์มบาง CuAlO_2 ด้วยเทคนิคอื่นอีกเช่น ดีซีสปีดเตอร์ริง ภายใต้การควบคุมปริมาณก๊าซ O_2 / Ar ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยทำให้ฟิล์มบางมีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง n-CdS/p-CuAlO₂

เอกสารอ้างอิง

1. Koyanagi T., Harima H., Yanase A., Katayama-yoshida H. "Materials Design of p-type Transparent Conducting Oxides of Delafossite CuAlO_2 by Super-Cell FLAPW Method." **J.Phys. Chem Solids.**, Vol.64, 2003, pp. 1443-1446.
2. Thomas G. "Materials Science: Invisible Circuits." **Nature.**, Vol.389, 1997, pp. 907-910.
3. Kawazoe H., Yasukawa M., Hyodo H., Kurita M., Yanagi H. and Hosono H. "p-type Electrical Conduction in Transparent Thin Films of CuAlO_2 ." **Nature.**, Vol.389, 1997, pp. 939-942.
4. Ingram B. J., Bertoni M. I., Poeppelmeir K. R. and Mason T. O. "Point Defects and Transport Mechanisms in Transparent Conducting Oxides of Intermediate Conductivity." **Thin Solid Films.**, Vol.486, 2005, pp. 86-93.
5. Park K., Ko K. Y. and Seo W. S. "Thermoelectric Properties of CuAlO_2 ." **J. Eur. Ceram. Soc.**, Vol.25, 2005, pp. 2219-2222.
6. Tate J., Jayaraj M. K., Draeseke A. D., Ulbrich T., Sleight A. W., Vanaja K. A., Nagarajan R., Wager J. F. and Hoftman R. L. "p-type for Use in Transparent Diodes." **Thin Solid Films.**, Vol.411, 2002, pp. 119-124.
7. Banejee A. N., Maity R., Ghosh P. K. and Chattopadhyay. "Thermoelectric Properties and Electrical Characteristics of Sputter-Deposited p- CuAlO_2 Thin Films." **Thin Solid Films.**, Vol.474, 2005, pp. 261-266.
8. Tsuboi N., Takahashi Y., Kobayashi S., Shimizu H., Kato K. and Kaneko F. "Delafossite CuAlO_2 Films Prepared by Reactive Sputtering Using Cu and Al Targets." **J. Phys. Chem. Solids.**, Vol.64, 2003, pp.1671-1674.
9. Alkoy E. M. and Kelly P. J. "The Structure and Properties of Copper Oxide and Copper Aluminium Oxide Coating Prepared by Pulsed Magnetron Sputtering of Powder Targets." **Vacuum.**, Vol.97, 2005, pp. 221-230.
10. Ohashi M., Iida Y. and Morikawa H. "Preparation of CuAlO_2 Films by Wet Chemical Synthesis." **J. Am. Ceram. Soc.**, Vol.85, No.1, 2002, pp. 270-272.
11. Tonooka K., Shimokawa K. and Nishimura O. "Properties of Copper-Aluminium Oxide Films Prepared by Solution Methods." **Thin Solid Films.**, Vol.411, 2002, pp. 129-133.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Katayama-Yoshida H., Koyanagi T., Funashima H., Harima H. and Yanase A. "Engineering of Nested Fermi Surface and Transparent Conducting p-type Delafossite CuAlO_2 : Possible Lattice Instability or Transparent Superconductivity?" *Solid State Comm.*, Vol.126, 2003, pp. 135-139.
13. Ran U. and Shock H. "Future Development of CdS/CuInSe_2 Thin Films Solar Cells." *Appl. Phys. A*, Vol.69, No. 7, 1999, pp. 131-147.
14. Paulson P. D. and Dutta V. "Study of in situ CdCl_2 Treatments on CSS Deposited CdTe Films and CdS/CdTe Solar Cells." *Thin Solid Films.*, Vol.370, 2000, pp. 299-306.
15. Tanaka K., Kubota T. and Sakabe Y. "Preparation of Piezoelectric $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ on ZrO_2 Substrate Using Low Temperature Firing." *Sens. Actuators A.*, Vol.96, 2002, pp. 179-183.
16. Yuan Z. C., Williams A. J. and Shields T. C. "The Production of Hexaferrite Thick Films by Screen printing." *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol.247, 2002, pp. 257-269.
17. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1971.
18. กามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ, "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์", รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
19. จูตินัย แก้วแดง. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ (CuInSe_2).", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
20. กามนิตย์ วงษ์เจริญ. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2531.
21. วีรชัย ลิภา, "การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.
22. อุปลัมภ์ นาครักษ์. "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวง ซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. สุกฤษฏี เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
24. Cullity, B.D. **Elements of X-ray Diffraction** . Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1956.
25. Marquardt M.A., Ashmore N.A. and Cann D.P. “Crystal chemistry and electrical properties of the delafossite structure.” **Thin solid films.**, Vol.496, 2006, pp.146-156.
26. K. S. Dieter, **Semiconductor Material and Device Characterization** 2nd ed., New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.
27. Hearle J. W. S., Sparrow J. T., Cross P. M. **The Use of the Scanning Electron Microscope.**, New York: Pergamon Press Ltd., 1973.
28. Gaewdang T., Chaminade J.P., Gravereau P., Garcia A., Fouassier C., Hagemuller P. “Crystal Structure and Luminescent Properties of Indium Titanate.” **Mat. Res. Bull.**, Vol.28, 1993, pp. 1051-1060.
29. Tesson O., Morsli M., Bonnet A., Jousseau V., Cattin L. and Messé G. “Electrical Characterization of CuInSe₂ Thin Films for Solar Cells Applications.” **Optical Material.**, Vol.9, 1998. pp. 511-515.
30. Runyan W. R., **Semiconductor Measurement and Instrument** 3rd ed., New York: Mc Graw-Hill, 1975.
31. สมฤทธิ์ วงศ์ณีโรจน์, “ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ควม โดยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
32. Elangovan E., Ramamurthi K. “Optoelectronic Properties of Spray Deposition SnO₂:F Thin Films for Windows Materials in Solar Cells.” **J. Optoelect. Adv. Mat.**, Vol.5, 2003. pp. 45-54.
33. Fahrenbruch A.L., Bube R.H. “Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion.” New York Academic Press Inc., 1983, p. 44.
34. van der Pauw L. J. “A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape.” **Philips Res. Repts.**, Vol.13, 1958, pp. 1-9.
35. ดุสิต เครื่องงาม. **โซลิตสเททฟิสิกส์**. กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยุคเข็ญ. 2535.

36. Gangopadhyay U., Kim K., Mangalaraj D., Yi J. "Low Cost CBD ZnS Antireflection Coating on Large Area Commercial Mono-Crystalline Silicon Solar Cells." **Applied Surface Science.**, Vol.230, 2004. pp. 364-370.
37. Tilley J.D. **Understanding Solids : The Science of Materials.** Chichester : John Wiley & Sons. 2004.
38. Caballero R. and Guillén C. "Optical and Electrical Properties of $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ Thin Films Obtained by Selenization of Sequentially Evaporated Metallic Layers." **Thin Solid Films.**, Vol.431-432, 2003. pp. 200-204.
39. ดุสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
40. สมเกียรติ สุขเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
41. Ohring M. **Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure.** 2nd ed. San Diego: ACADEMIC PRESS. 2002.
42. Gaewdang T., Chaminade J.P., Garcia A., Fouassier C., Pouchard M., Hagenmuller P., Jacquier B. "Crystal Growth and Luminescence Properties of $\text{In}_6\text{WO}_{12}$." **Mater. Lett.**, Vol.18, 1993, pp. 64-68.
43. Gaewdang T., Chaminade J.P., Garcia A., Pouchard M., Hagenmuller P., Jacquier B. "Luminescence of Ce^{3+} in The $\text{In}_x\text{SC}_{1-x}\text{BO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) Solid Solution." **J. Phys. Chem. Solid.**, Vol.55, 1994, pp. 501-504.
44. Moore D. M., Reynolds Jr. R. C., **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**, New York: Oxford University Press Inc., 1989.
45. Banejee A. N., Panda D. and Chattopadhyay K. K. "Fabrication of p-CuAlO₂/n-ZnO:Al Heterojunction Diodes for Transparent Electrodes." **Proceedings in Photonics 2004.**, 9-11 December 2004, Cochin, India
46. Manificier J.C., Gasiot J., Fillard J.P. "A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n, k and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film." **Journal of Physics E: Scientific Instruments.**, Vol.9, 1976. pp. 1002-1004.
47. Zribi M., Kanzari M., Rezig B. "Optical Constants of Na-Doped CuInS_2 Thin Films." **Material Letters.** , Vol.60, 2005. pp. 98-103.

48. Ueda K., Hase T., Yanagi H., Kawazoe H. and Hosono H. "Epitaxial Growth of Transparent p – type Conducting CuGaO₂ Thin Films on Sapphire (001) Substrate by Pulsed Laser Deposition." **J. Appl.Phys.**, Vol.89 (3), 2001. pp. 1790-1793.
49. Banerjee A.N., Ghosh CK and Chattopadhyay. "Effect of Excess Oxygen on the Electrical Properties of Transparent p-type Conducting CuAlO_{2+x}." **Thin Solid Films.**, Vol.89, 2005. pp. 75-83
50. Hamada I., And Katayama – Yoshida H . " Ab initio Study of Native Point Defects in Delafossite CuAlO₂." **AIP Conference Proceeding.**, Vol.772, 2005. pp.191-192.
51. Hamada I., And Katayama – Yoshida H. "Energy of Native Defects in CuAlO₂." **Physica B.**, Vol.376-377, 2006. pp.808-811.
52. Stauber R.E., Parilla P.A., Perkins J.D., Ginley D.S. "Growth and Chemical Substitution of Transparent P-type CuAlO₂." Vol. 623, 2000. pp. 625.
53. Ingram B.J., Gonzalez G.B., Kammler D.R., Bertoni, M.I. and Mason, T.O. "Chemical and Structural Factors Governing Transparent Conductivity in Oxides." **Journal of Electroceramics.**, Vol.13, 2004. pp. 167-175.
54. Lee M.S., Kim T.Y. and Kim D. "Anisotropic Electrical Conductivity of Delafossite-type CuAlO₂ Lamina Crystal." **Appl. Phys. Lett.**, Vol.79(13), pp. 2028-2030.
55. Banerjee A.N., Maity R. and Chattopadhyay K.K. "Preparation of P-type Transparent Conducting CuAlO₂ Thin Films by Reactive DC Sputtering." **Mater.Lett.**, Vol.58, 2003. pp. 10-13.
56. Banerjee A.N. and Chattopadhyay K.K. "Size-dependent Optical Properties of Sputter deposited Nanocrystalline P-type Transparent CuAlO₂ Thin Films." **J.Appl.Phys.**, Vol. 97, 2005. pp. 084308-1 - 084308-8.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 351401		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
CuAlO ₂ Copper Aluminum Oxide		2th	I	h	k	l
		15.678	10	0	0	3
		31.671	40	0	0	6
		36.690	47	1	0	1
		37.851	100	0	1	2
		42.282	23	1	0	4
		48.311	9	0	0	9
		52.870	4	1	0	7
		57.222	30	0	1	8
		65.263	26	1	1	0
		66.123	5	0	0	12
		66.871	15	1	0	10
		67.572	1	1	1	3
		72.423	1	0	1	11
		74.350	9	1	1	6
		77.259	2	0	2	1
		77.979	6	2	0	2
		80.891	2	0	2	4
		85.202	3	1	1	9
		90.229	2	0	1	14
		92.305	3	2	0	8
		100.198	3	1	1	12
		100.900	3	0	2	10
		104.608	2	1	0	16
		109.837	2	0	0	18
		111.194	1	2	1	1
		111.954	4	1	2	2
		112.859	1	0	1	17
		115.046	2	2	1	4
		128.451	3	1	2	8
		138.182	3	3	0	0
		140.439	2	2	1	10
		146.467	1	0	2	16
		147.921	1	0	1	20
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3m (166)		Mol. weight = 122.53				
a = 2.85670 c = 16.94300 Z = 3		Volume [CD] = 119.74				
		Dx = 5.097				
		Dm = 5.060				
COLOR :Dark blue						
SAMPLE PREPARATION ; Prepared by solid state reaction of Cu ₂ O and Al ₂ O ₃ at 1373 K in N ₂ atmosphere.						
ANALYSIS :Chemical analysis (wt.%) : Cu 51.8, Al 22.1,O 26.1.						
ADDITIONAL PATTERN: To replace 9-185						
GENERAL COMMENTS : 3R polytype						
*Private Communication,(1984) primary reference: Ishizawa, N., Tokyu Institute of Technology, Tokyo, Japan.						
*Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, Volume 39, page 564, (1983) unit cell data : Ishiguro, T.et al.						
Radiation :CuKa		Fitter : Not specified				
Lambda : 1.54180		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM :		External Standard : Si				
F30=45(0.0159,42)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 71.967		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
CuAl ₂ O ₄		2th	I	h	k	l	
		19.014	2	1	1	1	
Lattice : Face-centered Cubic		Mol. weight = 181.51	31.294	49	2	2	
S.G. : Fd3m (227)		Volume[CD] = 527.12	36.874	100	3	1	
a = 8.07800	Z = 8	I/Icor = 3.20	38.557	<1	2	2	
			44.845	17	4	0	0
			49.121	1	3	3	1
			55.700	13	4	2	2
			59.405	32	5	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 009558		65.289	40	4	4	0	
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 1468.		68.686	<1	5	3	1	
TEMPERATURE FACTOR : ITF		69.800	<1	4	4	2	
		74.184	4	6	2	0	
		77.409	7	5	3	3	
		78.475	1	6	2	2	
		82.700	2	4	4	4	
		85.842	<1	5	5	1	
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)							
primary refernce:							
* J.Am.Ceram.Soc., volume 55 , page 395, (1972):							
Cooley , R.F.,Read,J.S.							
Radiation :CuKα1	Fitter : Not specified						
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-1917		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
CuO Copper Oxide		2th	I	h	k	l
Lattice : Monoclinic		32.498	7	1	1	0
S.G. : Cc (9)		35.505	94	0	0	2
Mol. weight = 79.55		*35.505	94	-1	1	1
Volume[CD]=81.30		38.736	100	1	1	1
Dx = 6.499		38.933	30	2	0	0
a = 4.68930	Beta = 99.65	46.211	2	-1	1	2
b = 3.42680		48.662	28	-2	0	2
c = 5.13210	Z = 4	51.396	1	1	1	2
a/c = 1.36842	I/lor = 3.91	53.433	10	0	2	0
c/b = 1.49764		56.674	1	0	2	1
ICSD COLLECTION CODE : 089758		58.374	14	2	0	2
TEMPERATURE FACTOR : ATF		61.496	19	-1	1	3
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 196		65.775	14	0	2	2
		66.180	14	-3	1	1
		67.968	10	1	1	3
		68.059	13	2	2	0
		68.819	<1	-2	2	1
		71.589	<1	-3	1	2
		72.436	6	3	1	1
		72.947	<1	2	2	1
		75.034	6	0	0	4
		75.151	6	-2	2	2
		79.716	<1	0	2	3
		80.081	2	-2	0	4
		82.237	4	-3	1	3
		83.099	4	2	2	2
		83.596	3	3	1	2
		*83.596	3	4	0	0
		86.432	1	-4	0	2
		86.647	1	-2	2	3
		88.075	<1	1	3	0
		*88.075	<1	1	1	4
		89.679	5	-1	3	1
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)						
primary refernce :						
* J.Phys. : Condens. Matter, volume 3,page 8173, (1991):						
Asbrink, S., Waskowska,A.						
Radiation :CuKα1	Fitter : Not specified					
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 75-1531		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated			
Cu ₂ O Cuprite / Copper Oxide		2th	I	h	k	l	
		29.632	5	1	1	0	
Lattice : Cubic		Mol. weight = 143.09		36.503	100	1	
S.G. : Pn3m (224)		Volume[CD]= 77.31		42.402	35	2	
a = 4.26000	Z = 2	I/Icor = 8.28	52.581	1	2	1	
			61.519	27	2	2	0
			65.703	<1	2	2	1
			69.753	<1	3	1	0
			73.699	20	3	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 031057		77.567	4	2	2	2	
REMARKS FROM ICSD : No R value given		85.153	<1	3	2	1	
TEST FROM ICSD : At least one TF missing							
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce: * Z. Kristallogr., Kristalltallphys., Kristallchem., volume 57 , page Niggli, P.</p>							
Radiation : CuKα1		Fitter : Not specified					
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-2179		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
MgO Magnesium Oxide		2th	I	h	k	l
		36.940	12	1	1	1
Lattice : Face-centered Cubic		Mol. weight = 40.30	42.916	100	2	0
S.G. : Fm3m (225)		Volume [CD] = 74.69	62.308	45	2	0
a = 4.21140	Z = 4	I/cor = 3.04	74.694	5	3	1
			78.634	11	2	2
ICSD COLLECTION CODE : 060492						
TEST FROM ICSD : No R value given.						
TEST FROM ICSD : At least one TF missing						
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce: * Z. Anorg. Allg. Chem., Volume 332, page 230, (1940) : Schmahl, N.G., Barthel, J., Eikerling, G.F.						
Radiation : CuKα1		Fitter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายประธาน ประจวบโชค
 วัน เดือน ปีเกิด 20 กรกฎาคม 2523 ที่ มหาสารคาม
 ที่อยู่ 399/52 หมู่ 4 ต. ตลาดบางเขน เขตหลักสี่ จ.กรุงเทพมหานคร 10210
 ประวัติการศึกษา 2545 วิศวกรรมบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ สถาบันราชภัฏพระนคร
 2550 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระ
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) ฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์
 2) ระบบการเตรียมฟิล์มบาง

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2547 อาจารย์ผู้ช่วยสอน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
 คุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, P. Prachopchok, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham. "Some Properties of P-Type CuAlO_2 Thick Films Prepared by Screen Printing Method." 32th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, October 2006.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Prachopchok and P. Sittiketkorn. "Electrical Properties of P-Type CuAlO_2 Transparent Conducting Oxide." KMITL Sci. J., Vol. 6, no 1, 2006, pp. 70-77.