

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$



นางสาวกัลยา เดือนวิไลย
นางสาวลัดดาวรรณ นะเป้า
นางสาวศิวพร สวนอยู่

๒พ.
ก3987
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **81591**
วัน,เดือน,ปี..... **19 ส.ย. 2551**

b. 11934815
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Properties of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ Semiconducting Compound



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree of Bachelor
of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang


Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------------------|---|----------------|
| โครงการพิเศษเรื่อง | การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ | |
| นักศึกษา | นางสาวกัลยา | เดือนวิไลย์ |
| | นางสาวลัดดาวรรณ | นะเป้า |
| | นางสาวศิวพร | สวนอยู่ |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ | คณะวิทยาศาสตร์ |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.จิตินัย | แก้วแดง |

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

| คณะกรรมการตรวจสอบ | | ลายมือชื่อ |
|-------------------|----------------------------------|--|
| ประธานกรรมการ | รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ |  |
| กรรมการ | ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ |  |
| กรรมการ | อ. ณัฐพร พรหมรส |  |
| กรรมการที่ปรึกษา | รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง |  |



 (รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------------------|---|----------------|
| โครงการพิเศษเรื่อง | การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ | |
| นักศึกษา | นางสาวกัลยา | เถื่อนวิสัย |
| | นางสาวลัดดาวรรณ | นะเป้า |
| | นายศิวพร | สวนอยู่ |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ | คณะวิทยาศาสตร์ |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ประยุกต์ | |
| ปีการศึกษา | 2550 | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง | |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นให้ละเอียดและคลุกเคล้ากันดี จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปโดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องไฮโดรลิกความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง ผงผลึกที่อัดเป็นเม็ดแล้วจะเอาไปเผาในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบ โครงสร้างผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ส่วนภาพถ่ายของผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างได้จากการบันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกพหุพันธ์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้โดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ จากอุณหภูมิตั้งแต่ 80 K ถึง 240 K จากค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้สามารถระบุได้ว่าชนิดการนำไฟฟ้าแบบพีของผลึกพหุพันธ์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ มีสาเหตุมาจาก แวแคนซีของอะตอมโลหะและอะตอมออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในโครงผลึก รวมทั้งได้มีการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า-ความร้อนด้วยโดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิต่างๆด้วย

| | | |
|--------------------------------|--|--------------------|
| Special Project Title | Electrical Properties of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ Semiconducting Compound. | |
| Name | Miss Kanlaya | Thuanwilai |
| | Miss Laddawan | Napao |
| | Miss Siwaporn | Suanyu |
| Department | Applied Physics | Faculty of Science |
| Program | Applied Physics – Science | |
| Academic Year | 2550 | |
| Special Project Advisor | Assoc.Prof.Dr. Thitinai | Gaewdang |

ABSTRACT

In this special project, polycrystalline of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) were prepared by a solid state reaction method. The mixture of high purity of CuO , Al_2O_3 and $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ powder was ground and then pressed by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at 1100°C for 24 h. The crystal structure of polycrystalline of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ was checked by X-ray diffraction method. Surface morphology of samples was observed by scanning electron microscope (SEM). The activation energy values of the samples were estimated by the resistivity measurements as a function of temperature from about 80 K to 240 K. From the activation energy values, the origin p-type conduction in polycrystalline of $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ 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

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ อาจารย์ ฌัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมารวมไปถึงการปลูกฝัง สิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำ ปลอดภัยมาใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 Å ใน การศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้ ชุดอุปกรณ์ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เดชดิธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจุฑามาศ วัฒนานุรักษ์ คุณประธาน ประจวบโชค และ คุณฉัฐวัฒน์ ทুমเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้ อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้กราบขอพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวกัลยา เกื่อนวิสัย
นางสาวลัดดาพรรณ นะเป้า
นางสาวศิวพร สนวนอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ | 3 |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก | 5 |
| 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ | 5 |
| 2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของ โครงผลึก | 8 |
| 2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ | 10 |
| 2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร | 10 |
| 2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาลเลอร์ไรต์หรือซิงค์เบลนด์ | 11 |
| 2.1.3.3 โครงสร้างผลึกแบบเดลาฟอสไซต์ | 12 |
| 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 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ | 18 |
| 2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน | 21 |
| แบบส่องกราด | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ | 22 |
| 2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ | 23 |
| 2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก | 23 |
| 2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนซิก | 25 |
| 2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์ | 29 |
| 2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง | 31 |
| 2.2.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น | 32 |
| 2.2.5 ปรากฏการณ์ฮอลล์ | 34 |
| 2.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ | 39 |
| 2.3 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 41 |
| 2.3.1 ปรากฏการณ์ซีเบก | 41 |
| 2.3.2 ปรากฏการณ์เปลติเยร์ | 45 |
| 2.3.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน | 46 |
| 2.4 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ | 48 |
| 2.4.1 การนำไฟฟ้าแบบจำกัดกระแสไฟฟ้าโดยประจุปริภูมิ | 49 |
| 2.4.2 กระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิในฉนวน และกฎของมอตต์-เกอร์นี่(Mott-Gurney) | 49 |
| 2.4.3 กระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิในสารกึ่งตัวนำสมบูรณ์ | 52 |
| 2.4.4 ผลของกัณฑ์ประจุ | 54 |
| 2.5 แผนภาพเฟสของระบบ $Cu_2O-CuO-Al_2O_3$ | 59 |
| 2.6 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะเวลาไม่คงที่ | 61 |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย | 67 |
| 3.1 การเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดย วิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 67 |
| 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 67 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 67 |
| 3.1.3 วิธีการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 70 |
| 3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ในรูปแบบที่เป็นเซรามิกส์ | 71 |
| 3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค | 71 |
| 3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค | 71 |
| 3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า | 71 |
| 3.2.4 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ | 71 |
| 3.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ | 72 |
| 3.4.6 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก | 72 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล | 74 |
| 4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 74 |
| 4.1.1 เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 74 |
| 4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 75 |
| 4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 78 |
| 4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 80 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิห้อง(80 -280 K) | 83 |
| 4.1.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 86 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 88 |
| 5.1 สรุปผลการทดลองของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสาร ตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 88 |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ | 92 |
| เอกสารอ้างอิง | 93 |
| ภาคผนวก | 97 |
| ประวัติผู้เขียน | 105 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ | 6 |
| 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ | 7 |
| 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z) | 9 |
| 2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 22 |
| 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 70 |
| 4.1 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 76 |
| 4.2 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 77 |
| 4.3 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่องพาหะของเซรามิกส์ของสารประกอบ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 79 |
| 4.4 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่องพาหะของเซรามิกส์ของสารประกอบ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 80 |
| 4.5 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 82 |
| 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ $T_0(K)$, $\sigma_0(S.cm^{-1})$, $N(E_F)(cm^{-1}.eV^{-1})$, $R(cm)$, σR และ W ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 84 |
| 4.7 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (80 – 280 K) | 85 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 แสดงค่า W_H ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 87 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ | 5 |
| 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก | 9 |
| 2.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร | 10 |
| 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ | 11 |
| 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ | |
| ก. โครงสร้างชนิดรอมโบฮีดรต์ 3R | 13 |
| ข. โครงสร้างชนิดเฮกซะโกนอล 2H | 13 |
| 2.6 แสดงแผนภูมิคาร์ซีมีไอออนของโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟท์ของสารประกอบชนิดต่างๆ | 14 |
| 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึก | 16 |
| 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเคชันแบบขอบ | 16 |
| 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเคชันแบบสกรู | 17 |
| 2.10 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน | 17 |
| 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร็กก์ | 19 |
| 2.12 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD | 19 |
| 2.13 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ | 20 |
| 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 22 |
| 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ | 27 |
| 2.16 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง | 30 |
| 2.17 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า | 30 |
| 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง | 31 |
| 2.19 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น | 33 |
| 2.20 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น | |
| ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง | 34 |
| ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า | 34 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.21 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี | |
| ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x | 35 |
| ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x | 35 |
| 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ | 39 |
| 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d\Delta R_{MNOF}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B | 40 |
| 2.24 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 42 |
| ก. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 42 |
| ข. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 42 |
| ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยัง ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ | 42 |
| ง. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน | 42 |
| 2.25 ปรากฏการณ์เปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | |
| ก. หลักการวัดปรากฏการณ์เปลติเยร์ | 45 |
| ข. วงจรเปลติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิด n | 45 |
| ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแสไฟฟ้าไหล | 45 |
| 2.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบก สภาพนำไฟฟ้า และปริมาณพาหะ | 47 |
| 2.27 แสดงการกระจายของความต่างศักย์ตลอดแท่งฉนวน | 51 |
| 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าตามกฎของโอห์มไปสู่กฎของมอตต์-เกอร์นี่ (Mott Gurney) | 54 |
| 2.29 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำที่มีกับดักประจุ | 57 |
| 2.30 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $Cu_2O-CuO-Al_2O_3$ ที่ความดันย่อย P_{O_2} เท่ากับ 0.21 atm ซึ่ง | |
| ก. ได้จากผลงานของเกดัลลาและไวท์ | 60 |
| ข. ได้จากผลงานของเจคอบและอัลคอก | 60 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.31 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย P_{O_2} เท่ากับ 0.4 atm ซึ่ง | |
| ก. ได้จากผลงานของเกดัลลาและไวท์ | 61 |
| ข. ได้จากผลงานของเจคอบและอัลคอก | 61 |
| 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ | 72 |
| 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ | 73 |
| 3.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า | 73 |
| 4.1 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสาร CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ที่บดรวมกันและนำไปอัดเป็นเม็ดผลึก | 74 |
| 4.2 แสดงเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 75 |
| 4.3 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 75 |
| 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 77 |
| 4.5 แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 78 |
| 4.6 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าไฟฟ้า สภาพคล่องของโฮล และความหนาแน่นของโฮลของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 80 |
| 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึก | 81 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $1/T^{1/4}$ ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) | 84 |
| 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าเมื่อเทียบกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียม โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกเมื่อทำการ วัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (80 – 280 K) | 85 |
| 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของ เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียม โดยปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 86 |
| 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียม โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก | 87 |
| 5.1 แสดงระดับพลังงานผู้รับและระดับเฟอร์มิของเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{M}$ | 91 |
| 5.2 แสดงการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานกับคัก | 92 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

อุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ZnO, SnO₂ และ In₂O₃ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งชนิดการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบเอ็น และยากที่จะประดิษฐ์ให้เป็นชนิดพี เมื่อไม่นานมานี้คาวาโซเอะและเพื่อนงาน(Kawazoe; et.al, 1997) ได้รายงานว่าสามารถประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO₂ ชนิดพีโดยการระเหด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นพัลส์ (pulse laser deposition : PLD) หลังจากนั้นงานวิจัยฟิล์มบางของอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพีที่เป็นสารประกอบออกไซด์ก็ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นสารประกอบในกลุ่มเตลาฟอสไซต์ (delafossite) และกลุ่มอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กลุ่มเตลาฟอสไซต์ ได้มีการประดิษฐ์เป็นรอยต่อ p-i-n และหัวต่อ p-n ทั้งในแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และรอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ซึ่งพบว่ามีสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปทำเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงแบบต่าง ๆ เช่น จอแสดงผลแบบจอแบนชนิดไดโอดเปล่งแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น (Kawazoe; et.al. 1997) CuAlO₂ เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งในกลุ่มเตลาฟอสไซต์ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นทั้งแบบตรงและแบบเฉียงที่มีค่าเท่ากับ 3.5 และ 1.8 eV ตามลำดับ (Ingram; et.al. 2005) โครงผลึกมี 2 แบบ คือ 2H (เฮกซะโกนอล) และ 3R (รอมโบฮีดรัล) ซึ่งมีสเปซกรุป P6₃ / mmc และ R3m ตามลำดับ ความแตกต่างของ โครงผลึกทั้ง 2 แบบ คือ มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมของชั้นออกไซด์คริสตัล AlO₂ ที่ต่างกัน กล่าวคือ โครงผลึก 2H จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมของชั้นออกไซด์คริสตัล AlO₂ เป็นแบบ AaBbAaBb ส่วน โครงผลึก 3R จะเป็นแบบ AaBbCcAaBbCc (Park; Ko and Seo 2005)

ผลึกของสารประกอบ CuAlO₂ เตรียมได้จากวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid state reaction) โดยการบดสารตั้งต้น CuO กับ Al₂O₃ แล้วอัดให้เป็นเม็ด (pellet) จากนั้นจึงนำไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง สภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของเซรามิก CuAlO₂ มีค่าประมาณ 1 Ω-cm ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี เนื่องมาจากแวนเดนซีของอะตอม Cu หรือ อินเตอร์สติเชียลของอะตอมออกซิเจน (oxygen interstitial) (Banejee; et.al. 2005; Tate; et.al. 2002) สัมประสิทธิ์ของซีเบก (Seebeck coefficient) ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าสูงประมาณ 500 μV/K ดังนั้น สารประกอบ CuAlO₂ จึงมีปรากฏการณ์เชิงไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric effect) ที่โดดเด่นอีกชนิดหนึ่งของกลุ่มเตลาฟอสไซต์ (Tsuboi; et.al. 2003).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซรามิกส์ของสารประกอบ CuAlO_2 ได้มีการเจือด้วยธาตุต่างๆ เช่น Mg, Fe และ Cr เป็นต้น ซึ่งทำการเตรียมโดยวิธีเทปแคสติง (tape casting method) โดย Park. et.al. เสนอว่าสาร Mg จะเข้าไปแทนที่ในอะตอม Cu แทนที่จะเป็น Al^{3+} ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเจือ Fe และ Cr สภาพคล่องตัวลดลง แต่สารประกอบ CuAlO_2 มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดที่เนื่องจากแวนแวนดีของ Cu (V_{Cu}) โคคเด่นกว่าอินเตอร์สติเชียลของออกซิเจน(O_i) สภาพนำไฟฟ้าในระนาบ ab จะมากกว่าในแนวแกน c ประมาณ 25 เท่า เนื่องจากชั้น AlO_2 เป็นฉนวนไฟฟ้ายังไม่ยอมให้พาหะอิสระไหลในแนวแกน c ได้สะดวก

ในระนาบ ab อิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนที่ในแบบกระโดดระหว่าง Cu^0 กับ Cu^+ ซึ่งจะเห็นได้กับที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่า สารเจือ Mg^{2+} ที่เข้าไปแทนที่ในอะตอม Cu อาจมีผลต่อการกระโดดของพาหะ(อิเล็กตรอน)ในระนาบ ปริมาณของ Mg^{2+} ที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้ระยะการกระโดดมีค่าแปรเปลี่ยนได้มากขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีระยะกระโดดของโพรอนที่แปรเปลี่ยนได้(polaron variable range hopping) แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกลไกการนำไฟฟ้าจะขึ้นกับการกระเจิงที่ขอบของเกรนมากกว่าการที่พาหะถูกจับไว้ที่ Cu^+ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะสอดคล้องดีกว่าแบบจำลอง Seto

วัสดุที่มีสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานสูง ซึ่งมีประสิทธิภาพเป็นที่ต้องการสำหรับการผลิตกำลังไฟฟ้า (electric power) ในเทอมของการสูญเสียความร้อน และการทำให้เย็นลงของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ การคำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุเชิงไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric) ได้จากดัชนีคุณภาพ (figure-of-merit) วัสดุที่มีสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อน เช่น PbTe , SiC , SiGe และ FeSi_2 แสดงค่าที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้มีการสลายตัวได้ง่ายหรือมีการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิในอากาศ ดังนั้นการใช้ให้เป็นประโยชน์ของวัสดุนี้แบบที่เป็นตัวกำเนิดพลังงาน (power generators) จึงมีข้อจำกัด โลหะออกไซด์มีเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการศึกษาเพื่อเป็นทางเลือกของวัสดุที่มีสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อน(thermoelectric) เพราะว่าวัสดุนี้มีความร้อนสูงและมีความคงทนที่อุณหภูมิสูงในอากาศ ง่ายต่อการสร้าง และต้นทุนในการผลิตต่ำ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้วผลที่เกิดขึ้นจากสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric) ของโลหะออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดสารละลายของแข็ง
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 1.2.3 ศึกษาผิวหน้าผลึกเชิงมหภาคของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง รวมทั้งทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ (ที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องและที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง) เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.2.5 วัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.2.6 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะและปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้น CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- 1.3.2 ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_K\alpha$ เท่ากับ 1.504 \AA เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.3.3 ศึกษาผิวหน้าเชิงมหภาคของสารตัวอย่างเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
- 1.3.4 ทำการตรวจสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.3.5 ทำการตรวจสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อนโดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.3.6 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะ และปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีหลักการและรวบรวมข้อมูลผลงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์
- 1.4.2 ศึกษาการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้น CuO , Al_2O_3 และ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- 1.4.3 ศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาคของสารตัวอย่างเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_K\alpha$ เท่ากับ 1.504 \AA เครื่องเอ็กซ์เรย์คิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ โดยการวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.4.6 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) เพื่อคำนวณหาสภาพคล่องของพาหะ และปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
- 1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.8 เขียนรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยวิธีปฏิบัติการเกิดสารละลายของแข็ง
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงผลของการเจือ Mg ที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกส์ของสารประกอบ CuAlO_2 ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึง โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)
- 1.5.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานที่สำคัญของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

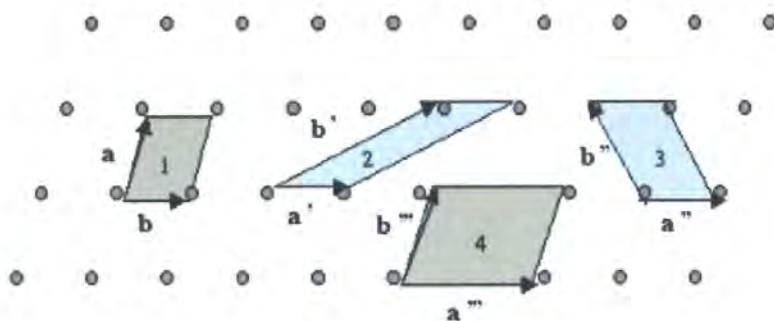
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินิช, 2530; Cullity, 1956)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบ แบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะ ได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a' และ b' และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของ โครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

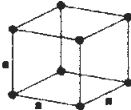
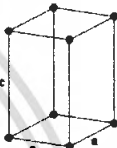
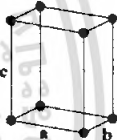

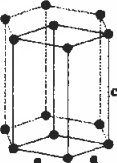
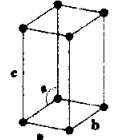
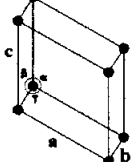
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

| ชนิดของโครงผลึกสองมิติ | ค่าคงที่ของโครงผลึก | 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 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่ประเภทในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนอล (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) | $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ |  |
| เฮกซะโกนอล (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) | $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ |  |

2.1.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย , 2530; Cullity 1956)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่ กำลังศึกษาอยู่นั้น

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 และไม่มี เครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2} 1]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

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

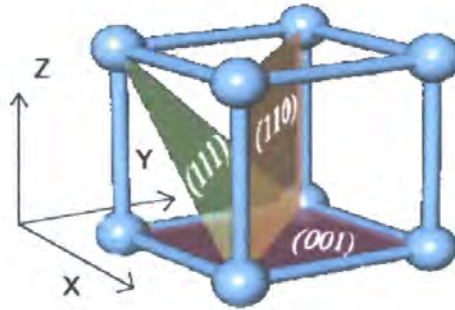
ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใด ให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่ เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น

2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ

3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็ม โดยการหาค่าผลคูณรวมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ (2.2) และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะ ตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

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

| จุดตัดแกนผลึก (x,y,z) | ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก | ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl) |
|--------------------------|---|-------------------------------------|
| (x, y, z) | $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$ | |
| $\infty, 1, \infty$ | $\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$ | (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 (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

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

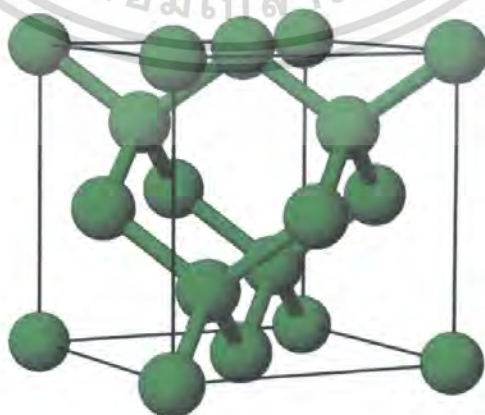
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ

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

2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2530; วีรชัย, 2547; อุปลัมภ์, 2548; สุกฤษฎี, 2547)

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



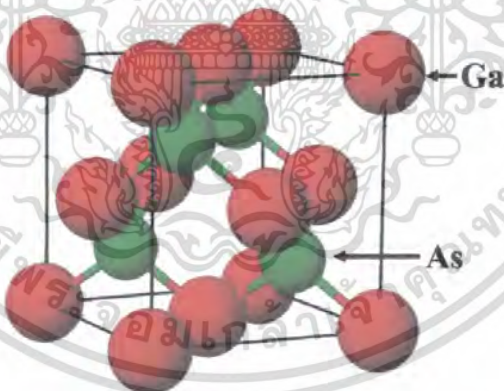
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure) (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547; อุปลัมภ์, 2548)

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

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



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

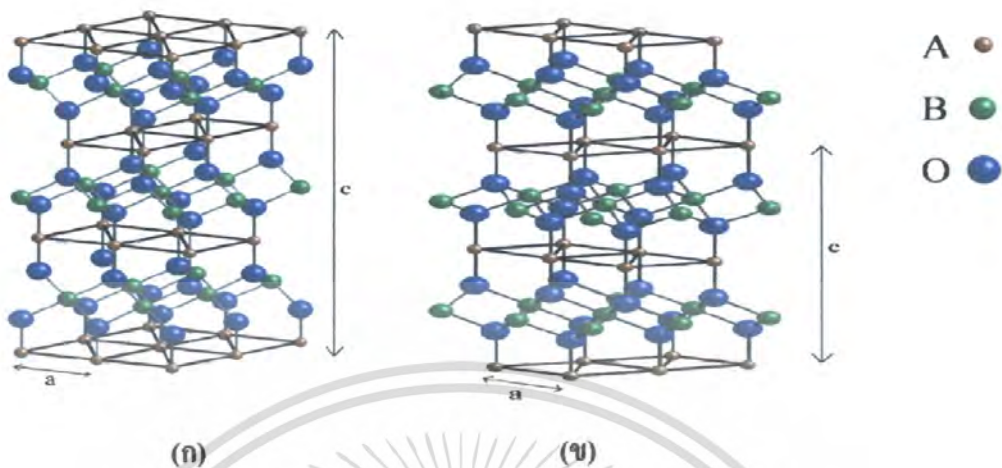
โดยที่อะตอมของ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0,0)$, $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ อะตอมของ As อยู่ที่ตำแหน่ง $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4},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

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V จะยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่ในกรณีนี้อะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ในกลุ่ม III (หรือกลุ่ม V) ที่เราแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสม (เช่น ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น) อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ga และ In ในโลหะผสม $Ga_xIn_{1-x}As$ จะเรียงตัวอย่างสุ่ม (random) อยู่ในโครงผลึกย่อยเฟสเช่นเตอร์คิวบิก ของธาตุกลุ่ม III

2.1.3.3 โครงสร้างผลึกแบบเคลตาฟอสไซต์ (chalcopyrite structure) (Marquardt, 2006)

สารประกอบเคลตาฟอสไซต์จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบออกไซด์เชิงสาม 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 อะตอมหรือเรียกว่าการจับพันธะแบบออกทระฮีดรัล (octahedral) โดยที่จะมีการใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกับอะตอม B ข้างเคียง ตัวอย่างของอะตอมในตำแหน่ง B ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe) และ แลนทานัม (La) เป็นต้น โครงสร้างเคลตาฟอสไซต์ประกอบด้วยชั้นหลักสองชั้นที่เรียงสลับสับเปลี่ยนกันไปซึ่งประกอบด้วยชั้นระนาบของอะตอม A ซึ่งจับกับออกซิเจนในแนวแกน c และชั้นของอะตอม B ซึ่งจับกับออกซิเจนแบบออกทระฮีดรัลหรือ BO_6 โดยโครงสร้างเคลตาฟอสไซต์มีการจัดเรียงตัวอยู่ 2 ชนิดโดยขึ้นกับทิศทางในการจัดเรียงตัวของแต่ละชั้น ในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABAB โดยมีทิศทางต่างกัน 180 องศา จะเรียกรวมการเรียงโครงสร้างแบบ เฮกซะ โกนอล 2H ซึ่งอยู่ในสเปซกรุ๊ป (space group) แบบ $P6_3/mmc$ ถ้าในกรณีที่ชั้น A มีการจัดเรียงตัวแบบ ABCABC โดยที่ AB มีทิศทางเดียวกันแต่ C ทิศต่างออกไป การจัดเรียงตัวแบบนี้เรียกว่า รอม โบฮีดรัล 2H ซึ่งมีสเปซกรุ๊ปแบบ $R\bar{3}m$ โครงสร้างเคลตาฟอสไซต์ในตำแหน่งของอะตอม A จะมีอะตอมที่ใช้ได้ในตำแหน่งนี้แล้วเกิดความเสถียรเพียงสี่อะตอมเท่านั้น แต่ในตำแหน่งของอะตอม B นั้นจะมีอะตอมที่มีความเหมาะสมอยู่หลายชนิด



(ก)

(ข)

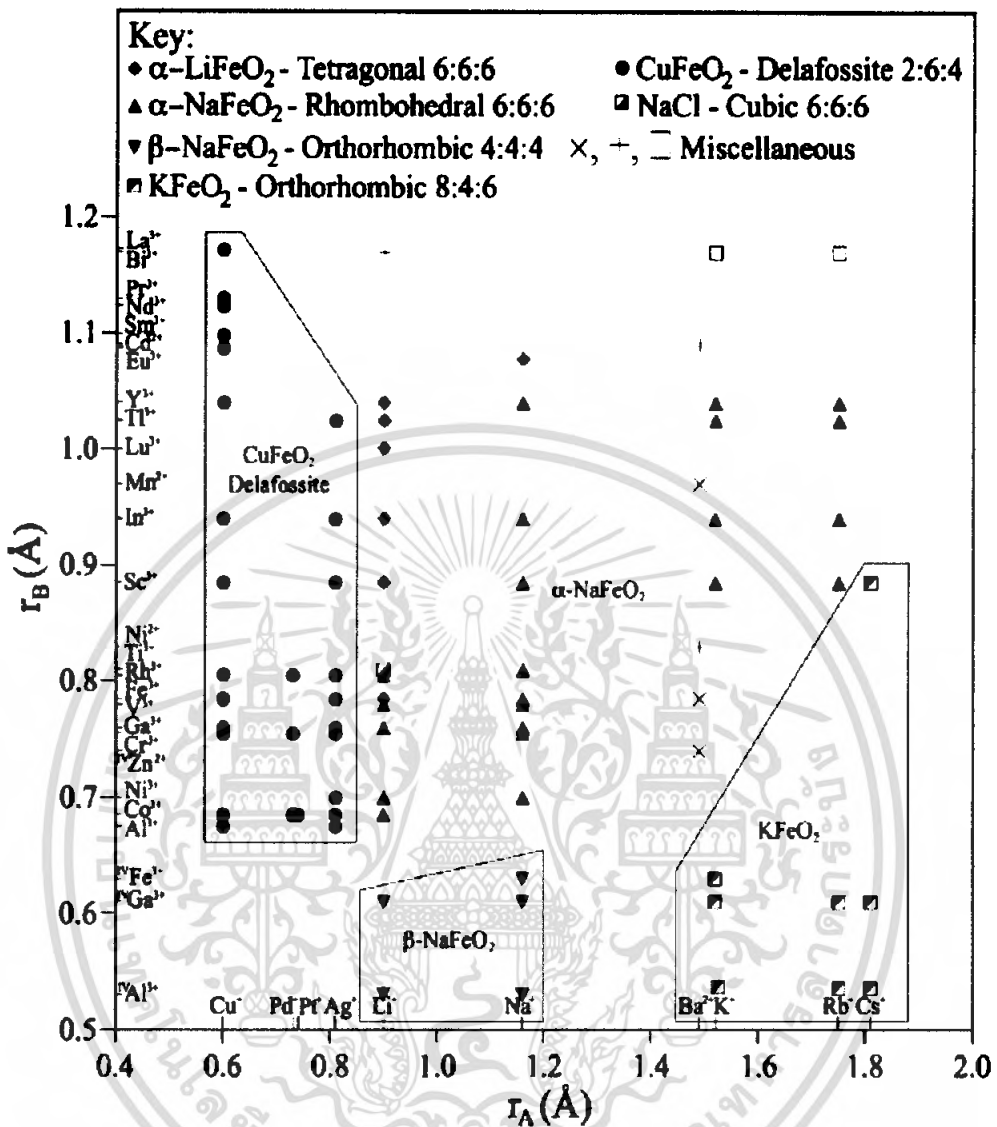
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตราฟอสไฟต์

ก. การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบรอมโบฮีดรัล 3R

ข. การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนอล 2H



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิค่ารัศมีไอออนของโครงสร้างผลึกแบบเดลาฟอสไซต์ของสารประกอบชนิดต่างๆ

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก (Kittle, 1971; งามนิคย์, 2545; ฐิตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด โดยเฉพาะ โครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตของเกรน (grain and grain boundaries)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

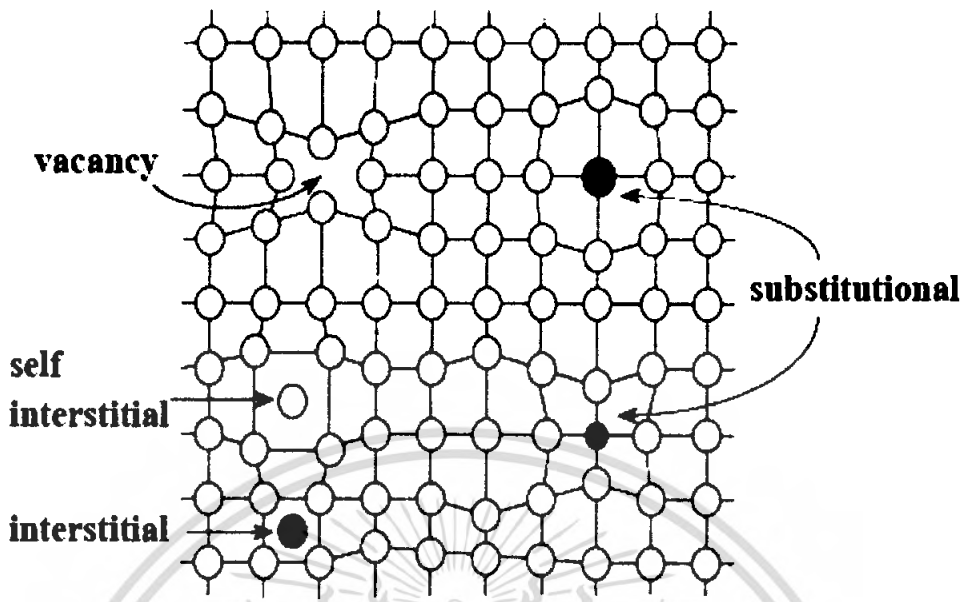
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.7 นี้ จะเกี่ยวข้องกับกาพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

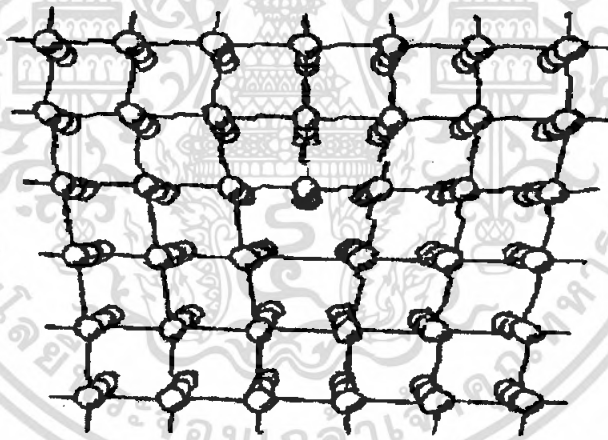
- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงสร้างผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงสร้างผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงสร้างผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงสร้างผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงสร้างผลึกทำให้ลักษณะของโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงสร้างผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.8 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.9

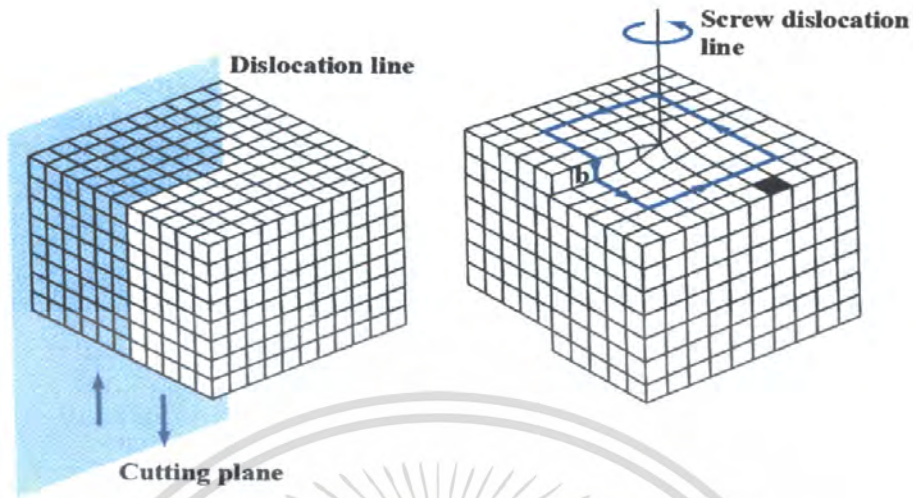


รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโลคชันแบบสกรู

2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (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 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547; อุปลักษณ์, 2548; สุกฤษฎ์, 2547; Cullity, 1956)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรค โครมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบร็กก์

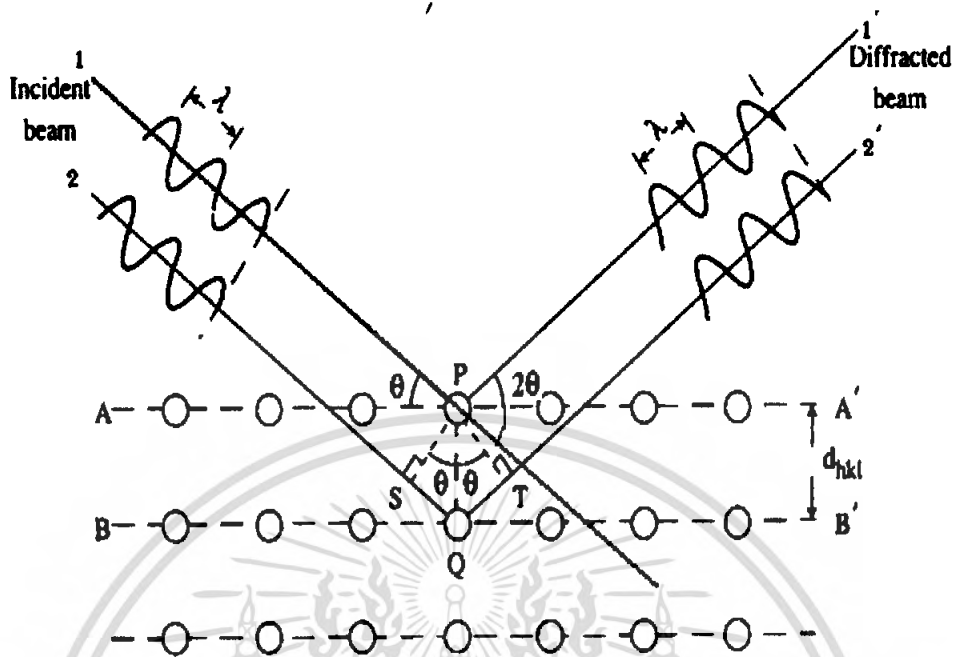
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้าง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

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

| | | | |
|-------|-----------|-----|--|
| เมื่อ | d_{hkl} | คือ | ระยะระหว่างระนาบ |
| | θ | คือ | มุมสะท้อนจากระนาบแบร็กก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ |
| | n | คือ | ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, |
| | λ | คือ | ความยาวคลื่น |

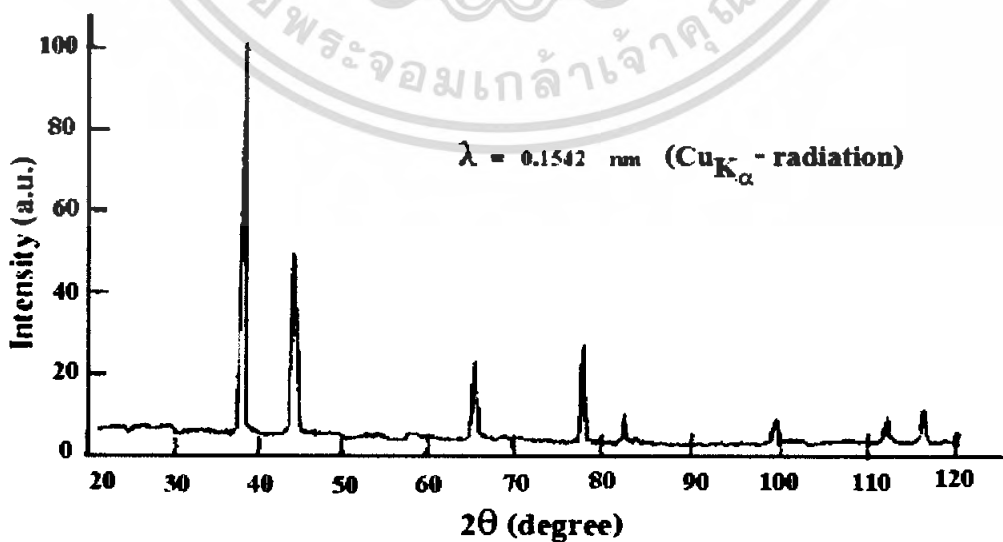
ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบร็กก์ เรียกว่าระนาบแบร็กก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่

2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร็กก์

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



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

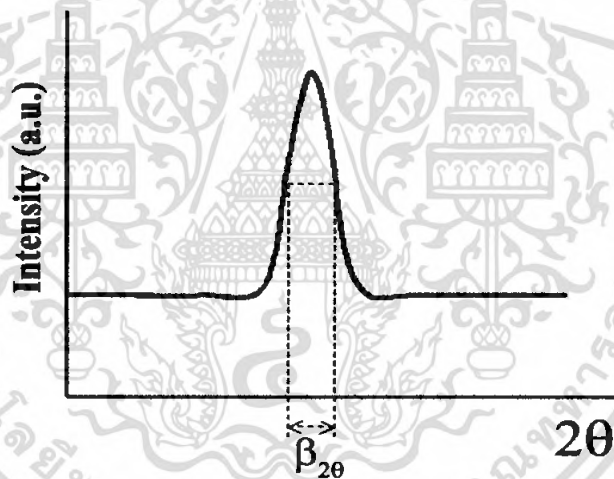
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ(2.3)

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

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ (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 คำนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.13 แสดงวิธีการหา β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

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 ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้ม

สูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของขนาดหัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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 เอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 วัตตรอม

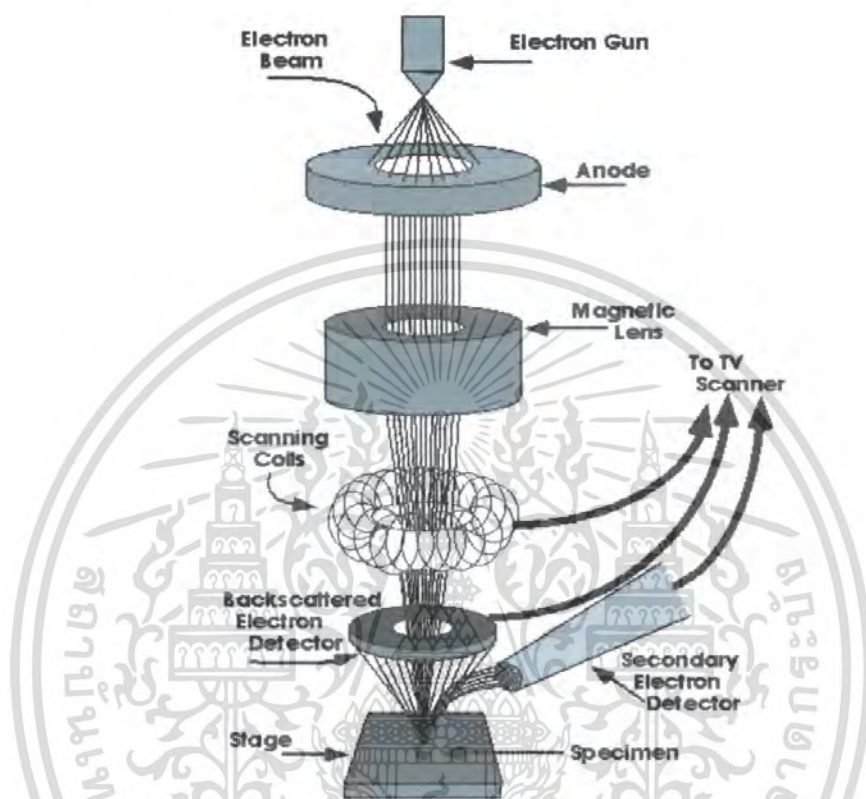
ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

| 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 โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยชดเชยสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวฟ เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ โดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2530; Kittel, 1971; Hearle, 1973; Runyan, 1975)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.6)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.6)$$

เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่ อุณหภูมิ T ใดๆ

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ 1.38×10^{-23} J/K ค่าคงตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

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

2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก

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

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.7)$$

เมื่อ N_C คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_C(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.8)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} J·s

จากสมการที่ (2.8) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์กลางอยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_i &= \int_0^{E_i} n(E) dE \\ &= \int_0^{E_i} N_C(E) f(E) dE \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมาก ๆ จนมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสถานะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)d(E)$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูง ๆ สมการที่ (2.9) จึงสามารถขยายขอบเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.9) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^\infty \frac{E^{2/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.10)$$

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

$$n_i = N_C \exp\left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$N_C = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.12)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.13)$$

โดย
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.14)$$

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

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.15)$$

และ
$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.16)$$

หรือ
$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_c^* m_h^*}{m^2} \right)^{3/4} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

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

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.19)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานซ้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

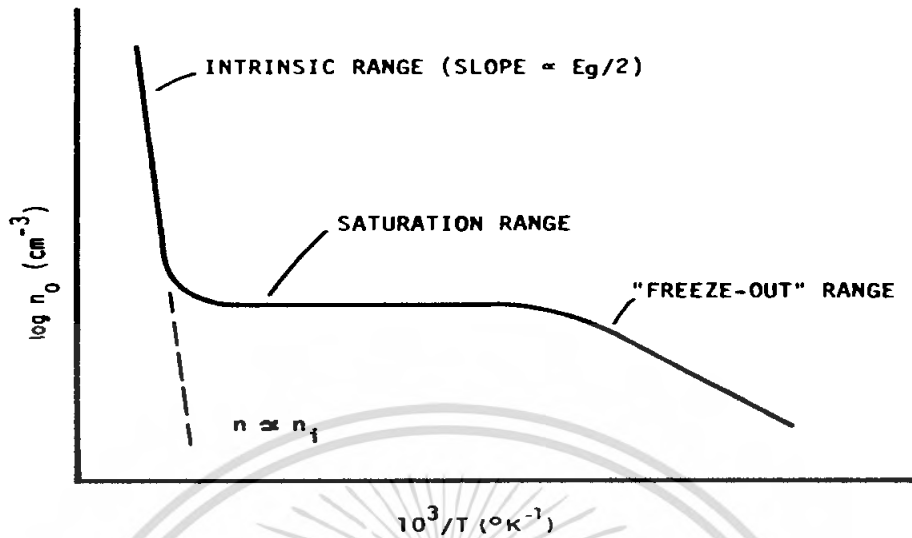
$$np = n_i^2 = N_C N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.20)$$

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

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.21)$$

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

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.15 คือ



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้จะคอมของสิ่งเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.21) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.23)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.24)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรีนสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.23) และ (2.24) จะกลายเป็นสมการอินทรีนสิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = p = n_i \quad (2.25)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มากจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.14) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.26)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.26) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.27)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.28)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.18), (2.27) และ (2.28) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.29)$$

$$\text{เมื่อ} \quad N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.30)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N'_c จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.31) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (Binomial series) จะได้

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

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.32)$$

ถ้า $N_d \gg N'_c$ สมการที่ (2.32) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N'_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.33)$$

ถ้า N_d มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N'_c \gg N_a$ จะทำให้สมการที่ (2.33) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.34)$$

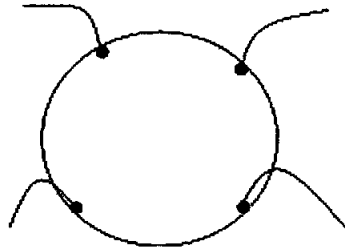
หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.35)$$

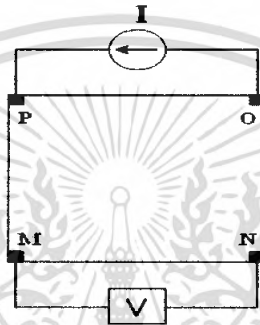
จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.34) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_d < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.35) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_d < N_d$

2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2530; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.17 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.36)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.36)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.37)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.37)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย
$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.39)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.40)$$

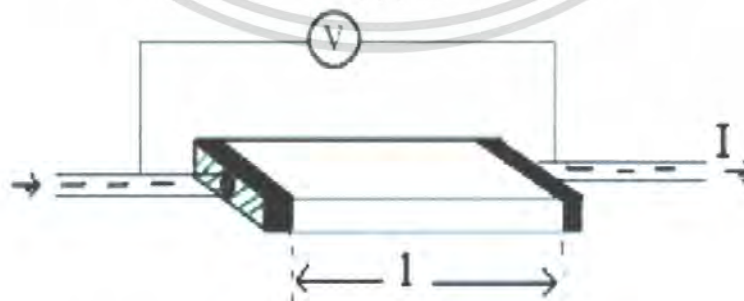
เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

(Runyan, 1975; สมฤทธิ, 2538; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der Pauw, 1958; คูสัต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.41)$$

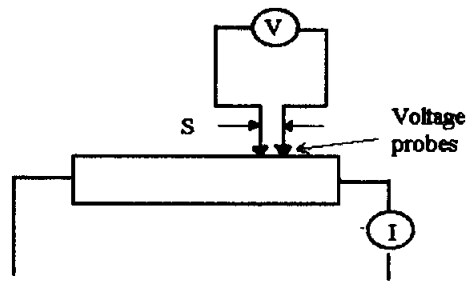
$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.42)$$

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

2.2.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

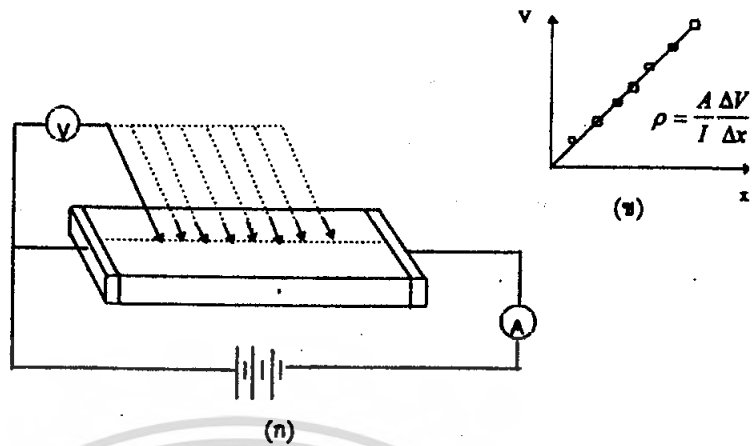
(Runyan,1975; สมฤทธิ, 2538; Elangovan, 2003; Fahrenbruch,1983; van der pauw, 1958; คูสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัด โดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.18 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.19 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีครั้งที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.20 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.2.5 ปรัชญาการฮอลล์ (Hall effect) (Kittel, 1971; Runyan, 1975; สมฤทธิ์, 2538; Elangovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.43)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.44)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.37) และ (2.38) คือ

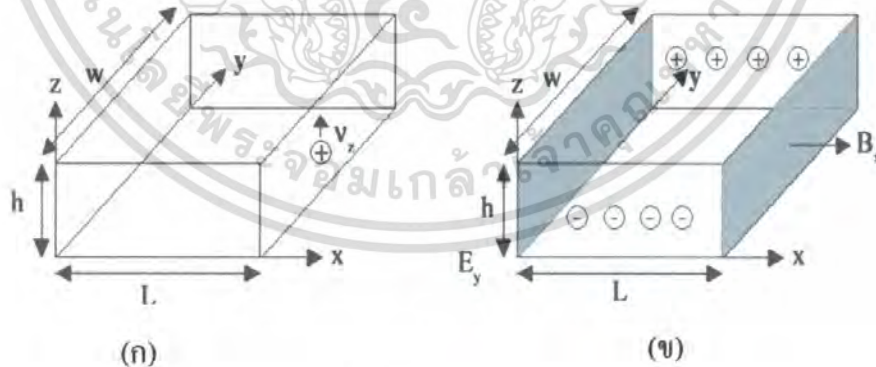
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.46)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล
$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.47)$$

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



รูปที่ 2.21 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว z หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ z ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_z เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง z คือ I_z ดังสมการที่ (2.42)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.48)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_z = qnwhv_z \quad (2.49)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.50)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.51)$$

จากรูปที่ 2.26

$$A = w.h \quad (2.52)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_z) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.36) และ (2.52)

$$\rho = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{wh}{L} \quad (2.53)$$

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

$$F = q(v_z \times B_x) + qE_y \quad (2.54)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_z B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z}{wh} \cdot B_x \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาสมการที่ (2.49) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_z B_x \quad (2.56)$$

เมื่อ
$$J_z = \frac{I_z}{wh} \quad (2.57)$$

แล้ว
$$R_H = \frac{E_y}{J_z B_x} = \frac{1}{qn} \quad (2.58)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z B_x}{wh} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_x}{h} \end{aligned} \quad (2.59)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \quad (2.60)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_z}{V_H} \cdot \frac{B_x}{qh} \quad (2.61)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลาย ๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.63)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.64)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.65)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนในซัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.66)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 G ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.53) และ (2.66) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.67)$$

หรือ จากสมการที่ (2.61)
$$\mu_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.68)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (งามนิคย์, 2545; จูตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สุกฤษณ์ 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958; Tilley, 2004; Caballero, 2003)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปีง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใด ๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.69)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \frac{d}{B} \cdot \Delta R_{MNOP} \quad (2.70)$$

เมื่อ ΔR_{MNOP} คือ ผลต่างระหว่างค่า R_{MNOP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

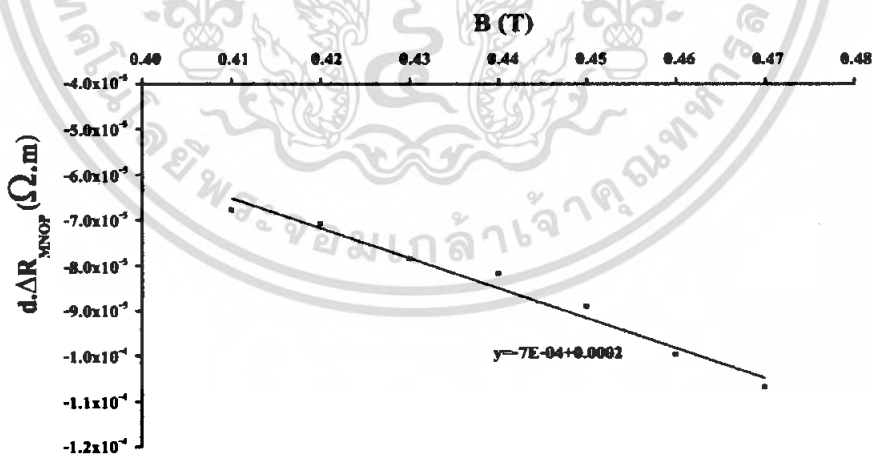
d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.93) จะได้ว่า

$$d \cdot \Delta R_{MNOP} = R_H B \quad (2.71)$$

เมื่อทำการวาดกราฟระหว่าง $d \cdot \Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.23 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d \cdot \Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \Delta R_{MNOP} \quad (2.72)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยจากจากความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.73)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.3 ปραกฏการณไฟฟ้าลังงานความร้อน (รูตินัย, 2530; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958; คูตติ2535; Gangopadhyay, 2004; Tilley, 2004; Caballero, 2003; สมเกียรติ, 2542)

ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ด้านความร้อนและด้านไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน โดยมีพลังงานจลน์และระดับพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอนเป็นตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์ เรียกว่า ปรากฏการณไฟฟ้าลังงานความร้อน (thermoelectric effect) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำมีปรากฏการณที่ สำคัญมี 3 ชนิด คือ ปรากฏการณซีเบก (Seebeck effect) ปรากฏการณเปลติเยร์ (Peltier effect) ปรากฏการณทอมสัน (Thomson effect)

2.3.1 ปραกฏการณซีเบก

ถ้านำโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิดมาต่อสัมผัสกันดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) และทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยสัมผัสนั้นเท่ากับ ΔT จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_s) ขึ้น ที่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง เราเรียกปรากฏการณเช่นนี้ว่า ปรากฏการณซีเบก และเรียก V_s ว่า ศักย์ไฟฟ้าความร้อน (thermoelectric potential) โลหะถูกนำไปใช้งานประยุกต์เป็นเทอร์โมคัปเปิล โดยอาศัยปรากฏการณนี้

สัมประสิทธิ์ของซีเบก (S) มีนิยามดังนี้

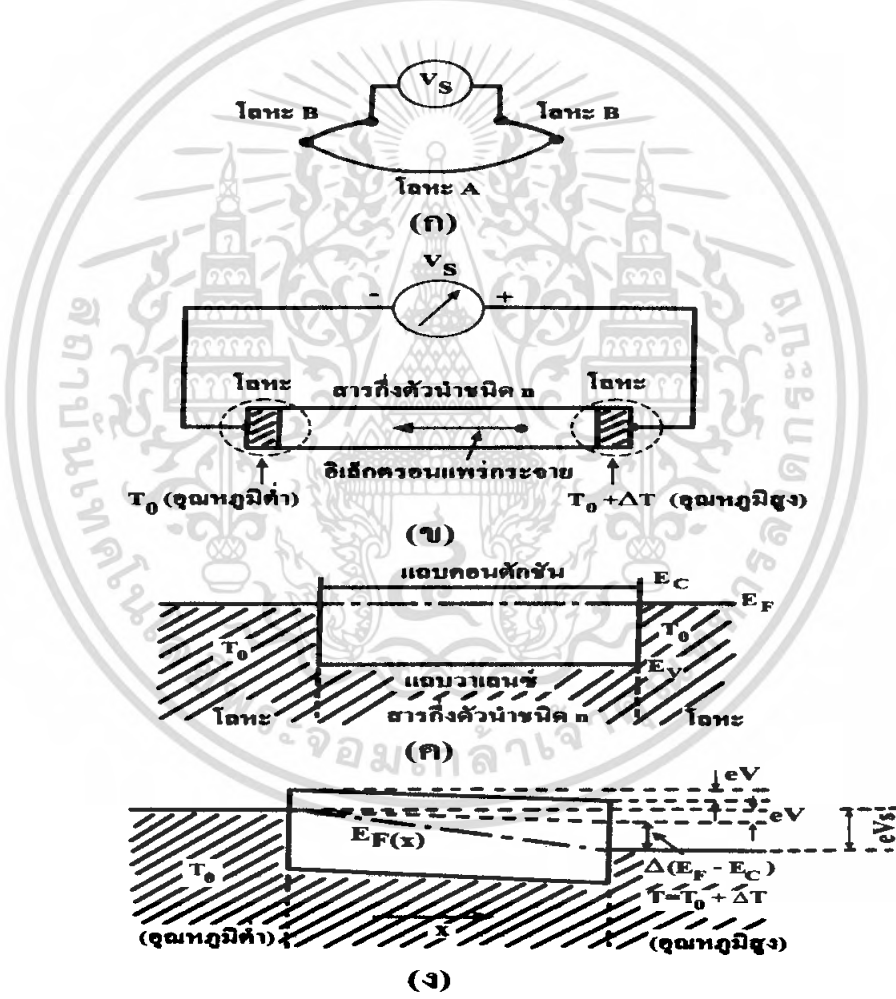
$$V_s = S\Delta T \quad (2.74)$$

ตามปกติค่า V_s ของสารกึ่งตัวนำจะสูงกว่าของโลหะ ทำให้การวัดค่า S ของสารกึ่งตัวนำ กระทำได้ง่ายกว่า

ในรูปที่ 2.23 (ข) ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำชนิด n มีโลหะชนิดเดียวกัน 2 ชนิด ติด สัมผัสอยู่และสมมุติว่าที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกันเป็น ΔT ถ้าอุณหภูมิของแท่งสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในย่านที่ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ ที่ด้านปลายของสารกึ่งตัวนำที่ร้อนกว่าจะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าด้านเย็นดังนั้นอิเล็กตรอนก็จะพยายามแพร่กระจายจากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็น เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้ด้านเย็นมีประจุค้างอยู่มากขึ้นและทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นสนามไฟฟ้านี้จะคอยผลการแพร่กระจายมาของอิเล็กตรอนและระบบก็จะอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้น ในรูปที่ 2.23 (ข) จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีเครื่องหมายดังแสดงในรูป แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีพาหะข้างมากคือ โฮลซึ่งจะไหลจากที่อุณหภูมิสูง ไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ขั้วของแรงดันไฟฟ้าสลับกับกรณีชนิดเอ็นจากปรากฏการณ์นี้ถ้าดูเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นหรือพี



รูปที่ 2.24 ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน

- ก. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน
- ข. วงจรการเกิดปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่ยังไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ
- ง. แผนภูมิแถบพลังงานขณะที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าซีเบก (V_s) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับเฟอร์มิ E_F ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากเราเคยทราบแล้วว่า E_F ก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยเพราะฉะนั้นความลาดของเส้นของระดับพลังงานเฟอร์มิ จึงไม่จำเป็นต้องเท่ากับความลาดของแถบพลังงานจากรูป 2.23 (ง) V_s มีค่าเท่ากับ

$V_s =$ ปริมาณการเปลี่ยนตำแหน่งของขอบแถบนำไฟฟ้า (V) + การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิเมื่อเทียบกับขอบ

$$\begin{aligned} E_c &= V + \frac{\Delta(E_F - E_C)}{e} \\ &= V + \frac{d}{dT} \left(\frac{E_F - E_C}{e} \right) \Delta T \end{aligned} \quad (2.75)$$

ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่ซึมจะต้องสมดุลกับกระแสพิศพาที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขณะที่ทำหะกำลังแพร่ซึม ดังนั้น

$$\begin{aligned} D_n (-e) \frac{dn}{dx} &= n(-e) \mu_e E \\ &= n(-e) \mu_e \left(\frac{-dV}{dx} \right) \\ \frac{dV}{dx} &= - \frac{D_n}{n \mu_e} \frac{dn}{dx} \end{aligned} \quad (2.76)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะสมมุติให้ความลาดของอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำนั้นสม่ำเสมอตลอดคั้งนั้น

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

และจากความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์ $D_n = \frac{kT \mu_e}{e}$ และให้ $\frac{d_n}{dx} = \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dx}$ ดังนั้นสมการที่ (2.76) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned}\frac{V}{L} &= -\frac{\left(\frac{kT\mu_e}{e}\right) \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dn}}{n\mu_e} \\ &= -\frac{kT}{en} \left(\frac{dn}{dT}\right) \frac{\Delta T}{L} \\ V &= -\frac{kT\Delta T}{en} \left(\frac{dn}{dT}\right)\end{aligned}\quad (2.77)$$

เมื่อ n มีค่า

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.78)$$

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

$$V = -\left\{ \frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} - \frac{d}{dT} \left(\frac{E_C - E_F}{e} \right) \right\} \Delta T \quad (2.79)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.75) และ (2.79) สัมประสิทธิ์ซีเบก (Seebeck coefficient: S) คือ

$$S = -\left(\frac{E_C - E_F}{eT} + \frac{3k}{2e} \right) \quad (2.80)$$

ในการคำนวณที่กล่าวมาข้างต้นนั้นไม่ได้คำนึงถึงความจริงที่ว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ได้แพร่กระจายจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำนั้นจะมีค่ามากกว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยแรงไฟฟ้า (induced) จากที่อุณหภูมิต่ำไปสู่ที่อุณหภูมิสูงถ้าจะพิจารณาเทอมนี้ด้วยทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อน (thermoelectric potential) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและสัมประสิทธิ์ซีเบกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีรูปเป็น

$$S = -\left(\frac{E_C - E_F}{eT} + 2\frac{k}{e} \right) \quad (2.81)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.78) ลงในสมการที่ (2.81) ก็จะพบว่าในกรณีสารกึ่งตัวนำอนติเจนเนอเรต (nondegenerated semiconductor) เมื่อความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าพลังงานความร้อนมีค่าลดลง

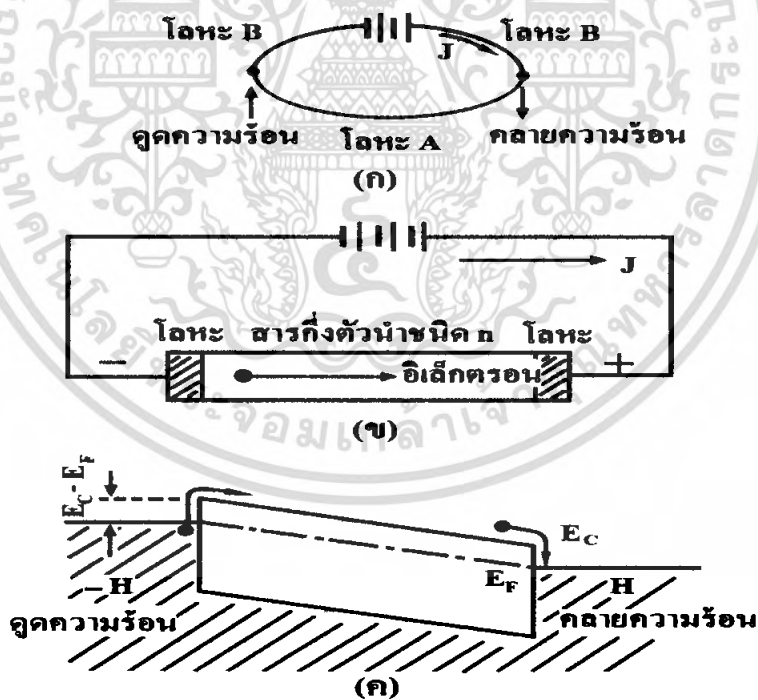
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดอินทรินสิกหรืออยู่ในย่านอุณหภูมิอินทรินสิก (intrinsic region) ที่ด้านอุณหภูมิสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ โฮลจะเพิ่มขึ้นและพาหะทั้งสองจะแพร่กระจายไปสู่ด้านอุณหภูมิต่ำ และก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น แต่เนื่องจากทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนและ โฮลมีทิศทางหักล้างกันดังนั้นแรงดันไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ได้นั้นจะเกิดจากแพกเตอร์ของความแตกต่างของความคล่องตัวของพาหะทั้งสองชนิดซึ่งมีค่าน้อยมาก

2.3.2 ปปรากฏการณ์เพลตติเยร์

การต่อตัวนำที่มีอุณหภูมิเท่ากันสองชนิดให้สัมผัสกัน และปล่อยให้กระแสไฟฟ้า J ไหลดังแสดงในรูปที่ 2.25 (ก) จะทำให้เกิดการปล่อยหรือดูดความร้อน (W) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพลตติเยร์ (Peltier effect) นิยามสัมประสิทธิ์เพลตติเยร์ (Peltier coefficient) คือ

$$W = \Pi J \tag{2.82}$$



รูปที่ 2.25 ปปรากฏการณ์เพลตติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. หลักการวัดปรากฏการณ์เพลตติเยร์
- ข. วงจรเพลตติเยร์ในสารกึ่งตัวนำชนิด n
- ค. แผนภูมิแถบพลังงานขณะมีกระแสไฟฟ้า J ไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปลองพิจารณารอยต่อสัมผัสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและโลหะ และปล่อยให้กระแสไฟฟ้าให้ไหล J ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) จากรูปที่ 2.24 (ค) อิเล็กตรอนที่สามารถไหลจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้นั้นจะต้องเป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่าค่าแฟงคีย์ $(E_C - E_F)/e$ และเมื่อรวมพลังงานจลน์เข้าไปอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเป็น $(E_C - E_F)/e + (3/2) kT$ การไหลของอิเล็กตรอนออกจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะเป็นการทำให้อิเล็กตรอนดึงพลังงานออกจากโลหะ ทำให้โลหะสูญเสียพลังงาน และโลหะก็จะเย็นตัวลงและอีกทางปลายด้านหนึ่งอิเล็กตรอนก็จะนำพลังงาน $(E_C - E_F)/e + (3/2)kT$ ไปให้กับโลหะทำให้โลหะอีกด้านหนึ่งร้อนขึ้น เพราะฉะนั้นพลังงาน ΔE ที่อิเล็กตรอนหนึ่งตัวนำพาไปคือ

$$\Delta E = (E_C - E_F) + \frac{3}{2} kT \quad (2.83)$$

ปริมาณความร้อน (W) ที่ถูกปล่อยออกมาหรือถูกดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยเวลา คำนวณได้โดยการคูณสมการที่ (2.83) ด้วยจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลต่อหน่วยเวลา นั่นคือ

$$W = \frac{\Delta E J}{e} = \left(\frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3}{2} \frac{kT}{e} \right) J \quad (2.84)$$

เพราะฉะนั้นสัมประสิทธิ์เพลติเยร์มีค่า

$$\Pi = \frac{E_C - E_F}{e} + \frac{3}{2} \frac{kT}{e} \quad (2.85)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.80) และ (2.85) จะพบว่าสัมประสิทธิ์ซีเบกและสัมประสิทธิ์เพลติเยร์มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\Pi = ST \quad (2.86)$$

ปรากฏการณ์เพลติเยร์ถูกนำไปใช้งานในการทำอุปกรณ์การทำความเย็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัสดุ Bi_2Te_3 และ Sb_2Te_3

2.3.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน

เมื่อปล่อยให้กระแสไฟฟ้า I เข้าสู่เส้นโลหะที่ปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิต่างกัน ΔT จะเกิดการคายหรือดูดกลืนความร้อนปริมาณ $\sigma \Delta T$ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect) τ คือสัมประสิทธิ์ทอมสัน (Thomson coefficient) ซึ่งมีค่าคงตัวของวัสดุหนึ่งๆ (แตกต่างกับ S เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ Π ซึ่งเกี่ยวข้องกับรอยต่อของวัสดุสองชนิด) τ จะมีค่าเป็นบวกถ้าเกิดการคายความร้อนโดยกระแสไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปที่อุณหภูมิต่ำ

สัมประสิทธิ์ทอมสันมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบคดังนี้

$$T \frac{dS_{ab}}{dT} = \tau_a - \tau_b \quad (2.87)$$

หรือ

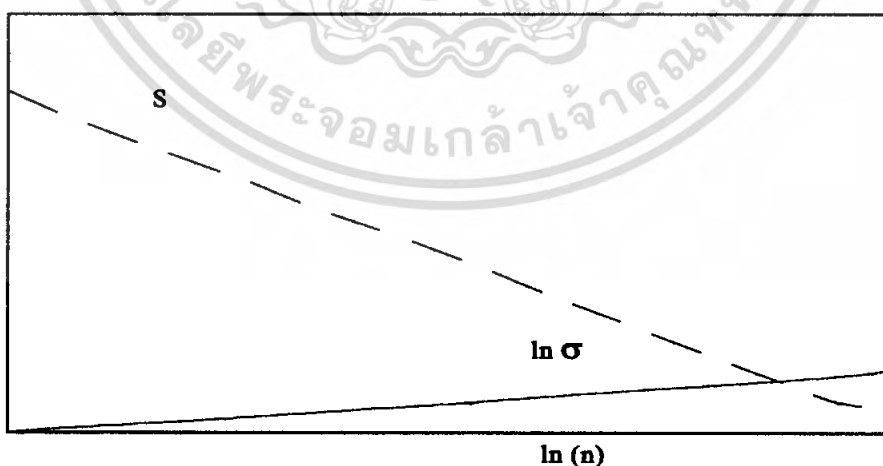
$$S_{ab} = \frac{\tau_{ab}}{T} = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT - \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.88)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่าความสัมพันธ์เคลวิน (Kelvin relation)

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

$$S_a = \int_0^T \frac{\tau_a}{T} dT \quad \text{และ} \quad S_b = \int_0^T \frac{\tau_b}{T} dT \quad (2.89)$$

จากความสัมพันธ์เหล่านี้จึงกล่าวได้ว่าสมการที่ (2.89) ก็คือนิยามของค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ซีเบค (absolute Seebeck coefficient) ของวัสดุ a และวัสดุ b นั่นเอง



รูปที่ 2.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบค(S) สภาพนำไฟฟ้า(σ) และ ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน(n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{-1/4} \right] \quad (2.91)$$

2.4.1 การนำไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ (space charge limited current)

การมีอยู่จริงของกระแสไฟฟ้าแบบจำกัดประจุค้ำในสารกึ่งตัวนำ เป็นสิ่งที่ขัดแย้งกับความ เป็นกลางของประจุ เมื่อมีการรบกวนความเป็นกลางของประจุในสารกึ่งตัวนำ พบว่าระยะเวลาที่ ประจุปริภูมิ (space charge) จะลดลงจากค่าที่เริ่มต้นจนเป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่ง เรียกว่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation time) ดังสมการ

$$\tau_R = \left(\frac{\epsilon}{\sigma} \right) \quad (2.92)$$

เมื่อ ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ

และยังพบว่าความหนาแน่นประจุปริภูมิที่ถูกสร้างขึ้นจากการฉีดกระแสหรือโดยวิธีการอื่น ใดก็ตามเข้าไปภายในสารกึ่งตัวนำ จะลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล คือ

$$\rho = \rho_0 \exp \left(- \frac{t}{\tau_R} \right) \quad (2.93)$$

จากสมการ(2.92) จะได้ว่าเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) เพิ่มขึ้นเมื่อสภาพต้านทาน ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกรณีของฉนวนจริงๆ เวลาผ่อนคลายจะมีค่ามากเป็นอนันต์เป็นการยืนยันว่า ประจุปริภูมิที่เกิดจากการฉีดพาหะเข้าไปนั้นจะไม่ถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากเวลาผ่อนคลายของประจุที่เกิดขึ้นจากการฉีดพาหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นอย่างปกติ โดยการ เคลื่อนย้ายของพาหะความร้อนแต่ในกรณีนี้ถือว่าไม่มีพาหะความร้อนอยู่ในฉนวน

2.4.2 กระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิในฉนวน และ กฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney)

เมื่อพิจารณาผลจากการฉีดพาหะเข้าไปในวัสดุที่เป็นฉนวนที่ดี(perfect insulator) โดยวัสดุ ที่เป็นฉนวนนี้มีลักษณะเป็นแท่งยาว พื้นที่ภาคตัดขวางด้านหนึ่งมีขั้วโลหะฉีดกระแส และอีกด้าน หนึ่งมีขั้วโลหะรับกระแส ขั้วสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) หรือขั้วฉีดกระแสอาจจะเป็นรอยต่อ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสตรง(forward biased junction) และขั้วโลหะรับกระแส (collecting contact) อาจจะเป็นรอยต่อไบอัสกลับทาง (reverse biased junction) เพื่อความสะดวกต่อการทำความเข้าใจ สมมติว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ทั้งหมด V_d ตกคร่อมขั้วสัมผัสจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมแท่งฉนวน โดยที่สมมติว่าความยาวของแท่ง ฉนวน(L)ยาวมากเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างของชั้นปลอดพาหะหรือชั้นโอห์มมิกที่ขั้วสัมผัสแบบโลหะ

จากเงื่อนไขข้างต้น เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำ หรือ นิด โซลเข้าสู่แถบวาเลนซ์ จะพบว่าปรากฏการณ์ทั้งสองจะไม่เกี่ยวข้องกัน ดังนั้นสามารถพิจารณาเพียงปรากฏการณ์ใดปรากฏการณ์หนึ่งก็พอ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าสู่แถบนำ

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าสู่ฉนวนอาจจะถูกพิจารณาเหมือนกับกรณีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วคาโทดเข้าสู่ระบบสุญญากาศ เช่นเดียวกับระบบวาล์วเทอร์มิออนิก ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่มีการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนเข้าไปในโซล เพราะถือว่าไม่มีโซลอยู่ในฉนวน

ความต่างศักย์และความหนาแน่นประจุ ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวนมีความสัมพันธ์กับสมการของปัวซงง(Poisson's equation) คือ

$$\left(\frac{d^2V(X)}{dx^2} \right) = - \frac{\rho(X)}{\epsilon} \quad (2.94)$$

โดยที่ความหนาแน่นกระแส ณ ตำแหน่งใดๆ ของแท่งฉนวน คือ

$$J = \mu \rho(X) \left(\frac{dV(X)}{dx} \right) \quad (2.95)$$

เมื่อ μ คือ สภาพคล่องของพาหะ

J คือ ความหนาแน่นกระแส

จากสมการ(2.94)และ(2.95)จะได้

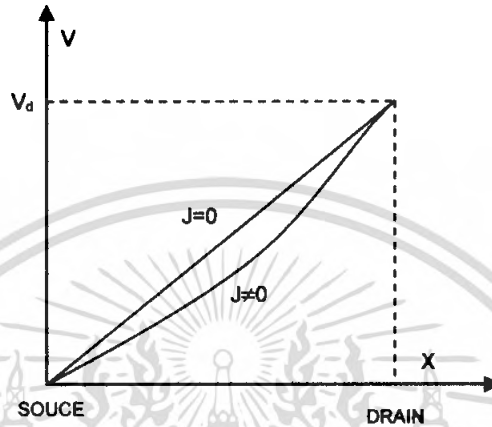
$$\left(\frac{d^2V}{dx^2} \right) = \left(\frac{1}{\epsilon \mu} \right) \frac{J}{\left(\frac{dV}{dx} \right)} \quad (2.96)$$

อินทิเกรตสมการ(2.96) จะได้

$$\left(\frac{dV}{dx} \right)^2 = \left(\frac{2J}{\epsilon \mu} \right) x + E_0^2 \quad (2.97)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ E_0 คือ ค่าของ (dV/dx) ที่จุดกำเนิด x ภายใต้เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าจำกัด โดยประจุปริภูมิ จะได้ E_0 มีค่าศูนย์นั่นคือความเข้มไฟฟ้า (electric intensity) ที่แหล่งกำเนิดมีค่าเป็นศูนย์ จากข้อสรุปข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาต่อไป



รูปที่ 2.27 แสดงการกระจายของความต่างศักย์ตลอดแท่งฉนวน

จากสมการ (2.97) พิจารณา ถ้า J ไม่เป็นศูนย์จะได้ว่า (dV/dx) เป็นฟังก์ชันเพิ่มสม่ำเสมอ (monotonic increasing function) ของ x สมมติว่ามีความเป็นไปได้ที่จะควบคุมการฉีดอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ฉนวนเมื่อไม่มีการฉีดอิเล็กตรอน J จะมีค่าเป็นศูนย์ จากสมการ (2.97) แสดงว่า (dV/dx) เท่ากับค่า E_0 ที่ทุกตำแหน่ง ซึ่งค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นจากค่าศูนย์จากแหล่งกำเนิดไปจนถึงค่า V_d ที่ตำแหน่งปลายสุด (drain) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 เมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไป จะว่าค่า J ไม่เป็นศูนย์ และจากสมการ (2.97) ซึ่งให้เห็นว่า (dV/dx) จะเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งปลายสุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีกระแสเป็นศูนย์ เพราะ (dV/dx) เป็นฟังก์ชันเพิ่มสม่ำเสมอของ x ดังนั้นจะได้ว่า (dV/dx) ที่แหล่งกำเนิดจะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่กระแสเป็นศูนย์ กล่าวคือกระแสที่ฉีดจะทำให้ E_0 มีค่าเป็นศูนย์ด้วย กระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าไปนี้เป็นกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ (space-charge-limited) และผลจากการเพิ่มขึ้นของการฉีดกระแสมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขัดขวางที่แหล่งกำเนิดซึ่งจะยับยั้งการเพิ่มขึ้นของกระแสจนถึงจุดที่ E_0 มีค่าเป็นศูนย์ โดยกระแสนี้จะถูกเรียกว่ากระแสฉีดจำกัด (injection-limited) เมื่อสมมติเงื่อนไขว่ากระแสที่ฉีดเข้าไปไม่เป็นกระแสฉีดจำกัด และให้ E_0 มีค่าเป็นศูนย์ ถ้าข้อสันนิษฐานที่ฉีดกระแสทุกๆ จุดไม่ใช่สาเหตุของขีดจำกัดการฉีดกระแส ในทางปฏิบัติพบว่าอิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปในแถบนำด้วยพลังงานศักย์ค่าหนึ่ง โดยในกรณีนี้จะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขัดขวางจำนวนเล็กน้อยขึ้นที่แหล่งกำเนิดและจุดที่ความเข้ม

ไฟฟ้าเป็นศูนย์จะปรากฏเป็นระยะทางสั้นๆ จากแหล่งกำเนิดระยะขั้วผล (effective length) จะมีบทบาทน้อยกว่าความยาวจริง จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่ออินทิเกรตสมการ(2.97) จะได้ว่า

$$V(x) = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\sqrt{\frac{2J}{\epsilon\mu}}\right) x^{3/2} \quad (2.98)$$

จากสมการ (2.98) จะได้ว่า $V(0)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และเมื่อ x คือความยาว (L) จะได้ว่า $V(x)$ เป็นความต่างศักย์ V_d ของแท่งฉนวน ซึ่งจะให้ความหนาแน่นกระแส คือ

$$J = \left(\frac{9}{8}\right) \left(\frac{\epsilon\mu}{L^3}\right) V_d^2 \quad (2.99)$$

สมการนี้เรียกว่า กฎของมอดต์-เกอร์นี ซึ่งคล้ายกับกฎเทอร์มิออนิกของ Child-Langmuir สรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ ในฉนวนมีค่าแปรตามความต่างศักย์ยกกำลังสอง V_d^2 ซึ่งขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของแหล่งกำเนิดแท่งยาวและรูปทรงของฉนวน

2.4.3 กระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิในสารกึ่งตัวนำสมบูรณ์

การพิจารณาสารกึ่งตัวนำสมบูรณ์จำเป็นต้องมีการสมมติเงื่อนไขว่าภายในสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นของพาหะกำเนิดความร้อน (n_T , thermally generated carriers) แต่ไม่มีกับดักพาหะ (carrier traps) และไม่มีปรากฏการณ์รวมตัวของพาหะเกิดขึ้น

สมมติว่าพาหะความร้อนคือ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำหรือเป็น โฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ ผลลัพธ์ที่ได้กรณีพาหะความร้อนจะสามารถมาพิจารณากรณีที่พาหะความร้อนคืออิเล็กตรอนในแถบนำกับโฮลในแถบวาเลนซ์

เมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ต่ำ (low drain voltage) V_d การนำไฟฟ้าที่พบจะเป็นการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก โดยที่ความหนาแน่นกระแสโอห์มมิก คือ

$$J = \left(\frac{q\mu n_T}{L}\right) V_d \quad (2.100)$$

เมื่อ n_T คือ ความหนาแน่นพาหะความร้อน

V_d/L คือ ความเข้มไฟฟ้าปกติในแท่งสารกึ่งตัวนำสมบูรณ์ที่ไม่มีประจุปริภูมิ

ที่ความต่างศักย์สูงการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ โดยที่ความหนาแน่นกระแสจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ยกกำลังสอง V_d^2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากกฎของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอห์มเข้าสู่กฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott Gurney) จะปรากฏเมื่อความหนาแน่นกระแสจากกฎทั้งสอง มีค่าเท่ากันโดยประมาณ จากสมการ (2.99) และ (2.100) จะได้ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลง V_T (transition voltage) คือ

$$\left(\frac{\epsilon\mu}{L^3}\right)V_T^2 \cong \left(\frac{q\mu n_T}{L}\right)V_T \quad (2.101)$$

$$V_T \cong \left(\frac{qn_T L^2}{\epsilon}\right) \quad (2.102)$$

ที่ความต่างศักย์นี้ เวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะของแท่งสารกึ่งตัวนำยาว มีค่าประมาณ

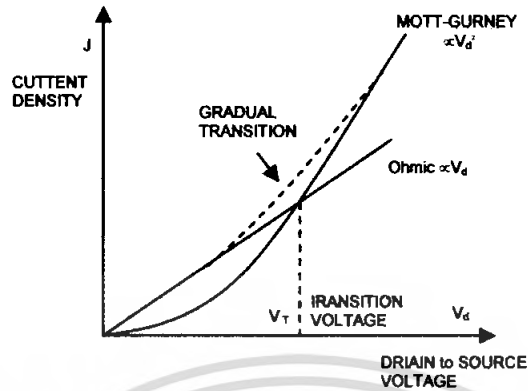
$$t_{Tr} \cong \frac{L}{\mu(V_T/L)} = \left(\frac{L^2}{\mu V_T}\right) \quad (2.103)$$

แทนค่า V_T จากสมการ (2.102) ลงใน (2.103) จะได้

$$t_{Tr} \cong \left(\frac{\epsilon}{q\mu n_T}\right) = \left(\frac{\epsilon}{\sigma}\right) \quad (2.104)$$

จากสมการ (2.104) จะได้ว่าเวลาการเปลี่ยนแปลงมีค่าโดยประมาณเท่ากับเวลาผ่อนคลายไดโพลีเทกตริก นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากกฎของโอห์มสู่กฎของมอตต์-เกอร์นีย์ จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะมีค่าโดยประมาณเท่ากับเวลาผ่อนคลายไดโพลีเทกตริก

จากประจูปริภูมิที่เกิดขึ้นได้เมื่อเวลาการเปลี่ยนแปลงของพาหะที่ฉีดเข้าไปสั้นกว่าเวลาที่พาหะจะเกิดการผ่อนคลายโดยพาหะความร้อนช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงดังรูป



รูปที่ 2.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าตามกฎของ โอมห์ไปสู่กฎของมอตต์-เกอร์นี่

จากรูปที่ 2.28 ที่ความต่างศักย์ (V_T) จากกฎของมอตต์-เกอร์นี่ ตามสมการที่ (2.99) เมื่อแทนค่า V_T จะให้ความหนาแน่นกระแสคือ

$$J \cong \left(\frac{\epsilon \mu}{L^3} \right) V_T^2 = \left(\frac{\mu}{\epsilon} \right) q^2 n_T L \quad (2.105)$$

จากสมการ (2.104) และ (2.105) สามารถนำมาหาจำนวนประจุภายในแท่งสารกึ่งตัวนำได้ โดยคูณความหนาแน่นกระแสกับค่าของเวลาการเปลี่ยนแปลง จะได้ว่า

$$J t_{Tr} = Q \cong q n_T L \quad (2.106)$$

ความหนาแน่นของพาหะที่ฉีดเข้าไปจะเป็นแบบกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ มีความต่างศักย์ (V_T) เปรียบเทียบได้เท่ากับความหนาแน่นพาหะความร้อน (n_T) โดยการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นพาหะความร้อนไม่พอเพียงต่อการผ่อนคลายของพาหะที่ถูกฉีด

2.4.4 ผลของกับดักประจุ

กับดักประจุ(trap) ในสารกึ่งตัวนำและฉนวน สามารถสังเกตได้จากลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำและฉนวน กับดักประจุมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีการรวมตัวกัน (recombination) และ ชนิดไม่มีการรวมตัวกัน (non recombination) ซึ่งชนิดที่ไม่มีการรวมตัวกันจะปรากฏเฉพาะในฉนวนเนื่องจากภายในฉนวนจะมีพาหะเพียงชนิดเดียวที่แสดงตัวออกมา โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = N_c \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \quad (2.107)$$

เมื่อ E_{Fn} คือ ค่าพลังงานเฟอร์มิสำหรับเงื่อนไขที่ไม่สมดุล (non equilibrium)
 N_c คือ ความหนาแน่นสถานะขั้วผล (effective density of states) ในแถบนำ
 และความหนาแน่นของกับดักที่เข้าครอบครองในแต่ละระดับพลังงาน คือ

$$n_t = \frac{N_t}{\left[1 + \exp\left(\frac{E_t - E_{Fn}}{kT}\right)\right]} \quad (2.108)$$

เมื่อ N_t คือความหนาแน่นของกับดักประจุโดยที่กับดักประจุทั้งหมดถูกสมมติว่าอยู่ที่ระดับพลังงานคงที่ค่าหนึ่งในที่นี้คือ E_t และจะไม่คำนึงถึงแฟกเตอร์สถานะซ้อนของสปิน (spin degeneracy factor) เมื่อพิจารณาสมการที่(2.107) และ (2.108) จะได้ว่าสมการที่ (2.107) คือ ค่าที่เกิดจากการประมาณด้วยฟังก์ชันเฟอร์มิ เพราะในสมการที่ (2.107) ค่า N_c น้อยกว่า N_t มาก ขณะที่สมการที่ (2.108) ค่า n_t จะใกล้เคียงกับ N_t และในสมการนี้จะใช้สมมติฐานสถานะกึ่งตัวเทียม (quasi equilibrium) ในการประมาณ โดยที่ E_{Fn} คือระดับเฟอร์มิขั้วผลที่กับดักประจุเข้าครอบครอง เหตุผลนี้เป็นสิ่งกำหนดเงื่อนไขความหนาแน่นพาหะที่จะไม่ทำให้สมบัติของกับดักประจุเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่สั้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาเฉลี่ยที่พาหะถูกจับไว้

เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} ต่ำกว่าระดับพลังงาน E_t มากกว่า $3kT$ กับดักประจุที่อยู่ในระดับพลังงาน E_t จะถูกจัดว่าเป็นกับดักประจุ แบบตื้น (shallow traps) ค่าประมาณฟังก์ชันเฟอร์มิจะเขียนอยู่ในรูป

$$n_t = N_t \exp\left[-\left(\frac{E_t - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \quad (2.109)$$

จากสมการที่(2.109) และสมการที่(2.107) สามารถที่จะนิยามค่า θ ขึ้นมาได้ คือ

$$\theta = \left(\frac{n}{n + n_t}\right) = \left[\frac{N_c}{N_c + N_t \exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right)}\right] \quad (2.110)$$

โดยค่าของ θ สำหรับกับดักประจุแบบตื้นที่อุณหภูมิใดๆ จะขึ้นกับความหนาแน่นของกับดักประจุและความลึกของระดับพลังงานของกับดักประจุ ($E_c - E_t$) เมื่อ $N_t \exp[(E_c - E_t)/kT]$ มีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_c จะพบว่าค่า θ จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมากซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ N_t มีค่ามาก หรือเมื่อ E_t ต่ำกว่า E_c หรือเงื่อนไขเกิดขึ้นพร้อมกัน และที่ θ มีค่าน้อยกว่าหนึ่งมากๆ นั้น อิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเกือบทั้งหมดจะเข้าสู่กับดักประจุ จะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เข้าสู่แถบนำและแสดงผลเหมือนกับพาหะประจุ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบจำกัดโดยประจุปริภูมิ ที่ความต่างศักย์ต่างๆจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกับดักประจุ เรียกเซตของกับดักประจุกับค่า θ น้อยๆว่าเซตของกับดักประจุแบบตื้น (dominant set : θ) โดยที่เซตนี้จะตอบสนองต่อค่าสูงสุดของ $N_t \exp[(E_c - E_t)/kT]$

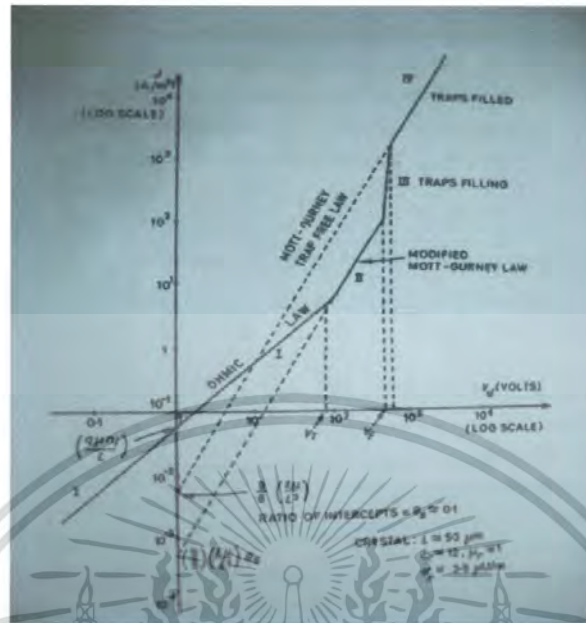
เพราะเหตุว่าเศษส่วนน้อยของพาหะที่ถูกฉีดที่มีค่าพอเหมาะสำหรับแถบนำเซตของกับดักประจุแบบตื้น (dominant set : θ) ของกับดัก (θ) ดังนั้นจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าแบบจำกัดโดยประจุปริภูมิในสมการที่ (2.105) ลดลงด้วยเศษส่วนน้อยนี้ ซึ่งจะได้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบจำกัดโดยประจุปริภูมิ คือ

$$J = \theta_s \left(\frac{9}{8} \right) \left(\frac{\epsilon \mu}{L^3} \right) V_d^2 \quad (2.111)$$

เมื่อผลจากพาหะความร้อนที่เกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกสู่การนำไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ จะปรากฏที่ความต่างศักย์ ดังแสดงในสมการที่ (2.108) เมื่อมีผลของเซตของกับดักประจุแบบตื้น (dominant set of shallow traps: θ_s) ความต่างศักย์ (V_T) จะอยู่ในรูปของ

$$V_T \cong \left(\frac{qn_T L^2}{\theta_s \epsilon} \right) \quad (2.112)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับผลของกับดักประจุต่อการนำไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำสามารถนำมาสรุป และแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของสารกึ่งตัวนำที่มีกับดักประจุ

ในรูปที่ 2.29 สมมติว่าความหนาแน่นของกับดักประจุมีค่าประมาณ 10^{20} ต่อลูกบาศก์เมตร โดยให้กับดักประจุหนึ่งตัวสำหรับทุกๆ โคร่งผลึกไอออน นั่นคือ (N_t/N_c) มีค่าอยู่ในระดับ 10^7

เมื่อ $(E_c - E_t)$ มีค่า 0.54 eV ที่อุณหภูมิห้องและ kT มีค่าประมาณ 0.03 eV จากสมการ (2.110) จะได้ว่า θ มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.03 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ N_t จะส่งผลต่อค่า θ และสองเท่าของ $(E_c - E_t)$ จะทำให้ θ มีค่าลดลงประมาณ 10^{-10}

จากเหตุผลข้างต้นทำให้ได้ว่าเมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุแบบตื้น (dominant shallow traps) อยู่ลึก การนำไฟฟ้าแบบ กระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปรักุมิจะไม่ถูกนำมาพิจารณา และพบว่าค่าความต่างศักย์เปลี่ยนแปลง (transition voltage $:V_t$) ในสมการ (2.112) จะสูงมาก อาจถึงหนึ่งร้อยโวลต์สำหรับผลึกที่หนา 50 ไมครอน หรือหนามากกว่านี้แต่ถ้า n_t มีค่าน้อยมากๆ ผลที่เกิดจากการที่กับดักประจุแบบตื้นอยู่ลึก จะตอบสนองต่อความต้านทานโอห์มมิกที่สูงมาก

เมื่อ N_t มีค่าเท่าเดิม แต่ $(E_c - E_t)$ มีค่า 0.27 eV ซึ่งลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง จะทำให้ค่า θ มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่หนึ่งจนถึงหนึ่งในสี่ส่วน ในหนึ่งพันส่วน ซึ่งในกรณีนี้การนำไฟฟ้าจะใกล้เคียงกับกฎของมอดต์-เกอร์นี่

จากสมการ(2.102)เมื่อระดับพลังงาน E_{Fn} อยู่เหนือระดับพลังงาน E_t มากกว่า $3kT$ จะได้ว่า

$$N_t \cong N_c \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.113) จะได้ว่ากับดักประจุเกือบทุกตัวอยู่ในสภาพเต็ม ซึ่งกับดักประจุเหล่านี้จะเปรียบเสมือนกับดักประจุลึก(deep traps) และค่า θ สำหรับกรณีนี้จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง โดยไม่คำนึงถึงความหนาแน่นของกับดักประจุ (N_t) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ N_c โดยที่กับดักประจุลึกเหล่านี้จะไม่มีอิทธิพลต่อกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิ ในทุกๆจุด

การแบ่งชั้นระหว่างระดับพลังงานของกับดักประจุแบบตื้นกับแบบลึกนั้น ไม่มีความแน่นอน แต่ค่อนข้างขึ้นอยู่กับระดับที่ฉีดพาหะ เมื่อระดับที่ฉีดพาหะยกขึ้น และระดับกึ่งพลังงานเฟอร์มิยกขึ้น เหนือกว่าระดับพลังงาน E_c อยู่ $3kT$ ซึ่งจะได้ว่ากับดักประจุทุกตัวจับพาหะไว้เต็ม และเปลี่ยนจากกับดักประจุแบบตื้นไปสู่ กับดักประจุแบบลึก

เมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์สำหรับแท่งฉนวนที่ประกอบด้วยเซกต์เดี่ยวของกับดักประจุแบบตื้นที่สภาวะสมดุล ในระยะเริ่มแรกที่ความต่างศักย์ต่ำ (V_d) ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์จะเป็นแบบเชิงเส้น ตอบสนองต่อการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก

การนำไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าจำกัดโดยประจุปริภูมิซึ่งปรับปรุงมาจากกฎของมอดต์-เกอร์นี ตามสมการ(2.111)จะเริ่มต้นเมื่อ V_d เพิ่มขึ้นจนถึงความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของกับดักประจุแบบตื้น (shallow trap transition voltage : V_t) ตามสมการ (2.112) ซึ่งการนำไฟฟ้าในช่วงนี้คือ แถบที่ II ในรูปที่ 2.29 โดยในช่วงนี้จะมีพาหะที่ถูกฉีดจำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เข้าสู่แถบนำ ส่วนที่เหลือจะเข้าสู่กับดักประจุระดับกึ่งพลังงานเฟอร์มิจะเคลื่อนย้ายไปสู่ระดับพลังงานกับดัก (E_t) เมื่อประจุเพียงพอที่จะถูกฉีดเข้าไปในแท่งฉนวนเพื่อที่จะทำให้กับดักประจุเต็ม การนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของมอดต์-เกอร์นี ตามสมการ(2.99) ดังแสดงในแถบ ดังรูปที่ 2.29 การประมาณค่าของความต่างศักย์ของการเปลี่ยนแปลงในช่วงสุดท้าย สามารถหาได้ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยภาคตัดขวางของแท่งฉนวนอยู่ในรูปของ (ϵ / L) และ (qN_tL^2) คือ ประจุที่ต้องการในการเติมกับดักประจุให้เต็มต่อหนึ่งหน่วยภาคตัดขวางของแท่งฉนวน ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความจุประจุได้ คือ

$$V_F \cong \left(\frac{Q_F}{C} \right) \cong \left(\frac{qN_tL^2}{\epsilon} \right) \quad (2.114)$$

ค่าความต่างศักย์ V_F เป็นค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการเติมกับดักประจุให้เต็ม เมื่อกับดักประจุถูกเติมจนเต็ม ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่ยกตัวสูงขึ้นอย่างฉับพลันจะปรากฏดังแสดงในแถบที่ III ในรูปที่ 2.28 ลักษณะเฉพาะนี้จะรวมเป็นหนึ่งเดียวกับกรณีกฎของการไม่มีกับดักประจุ (trap free law) ดังแสดงในแถบที่ 4 ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน กรณีสุดท้าย ถ้าความต่างศักย์ V_F เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งมากกว่า ซึ่ง V_F เหมือนกับกรณีที่ θ มีค่าน้อยๆส่งผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ในแถบที่ 2 ไม่เกิดขึ้น และลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะเป็นกรณีการเปลี่ยนแปลงจากแถบที่ I ไปยังแถบที่ III

2.5 แผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ (ฐิตินัย, 2530)

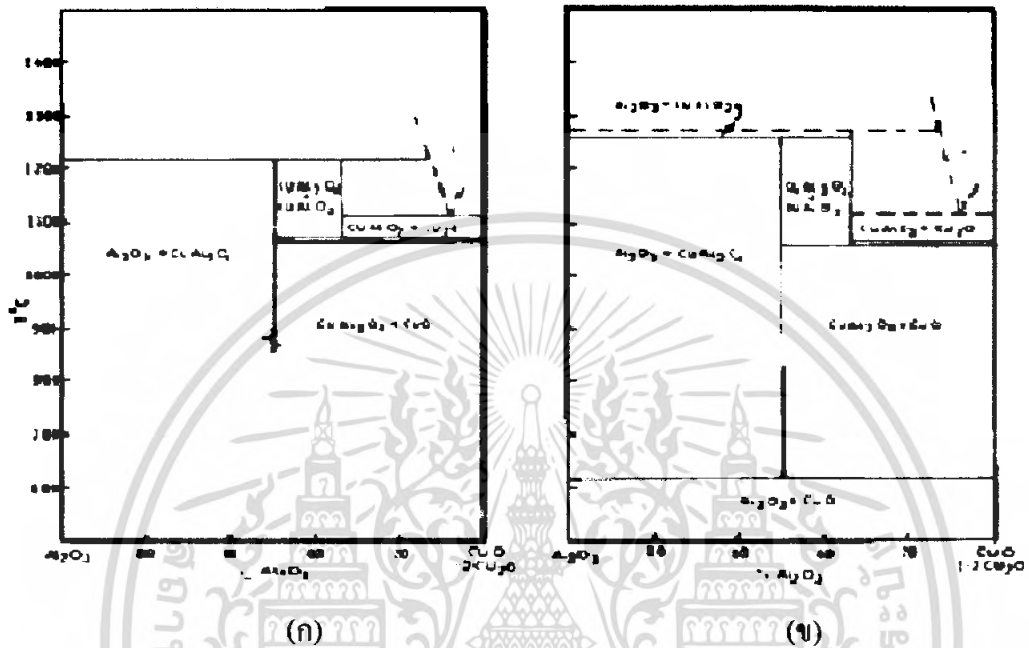
จากแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ พบว่ามีเฟสสถานะของแข็งจำนวน 3 เฟส เกิดร่วมกับเฟสสถานะแก๊ส และจะเรียกระบบนี้ว่าเป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบครั้งเดียว (monovariant) และที่ความดันย่อยของแก๊สออกซิเจนค่าใดค่าหนึ่ง เฟสสถานะของแข็งจำนวน 3 เฟส รวมกับเฟสสถานะแก๊สแล้วจะกลายเป็น 4 เฟส ซึ่งเฟสทั้ง 4 นี้จะเกิดร่วมกันได้ที่อุณหภูมิค่าเดียวเท่านั้น รูปที่ 2.30 และรูปที่ 2.31 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O-CuO-Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย P_{O_2} เท่ากับ 0.21 และ 0.4 atm ตามลำดับ เส้นตรงในแนวตั้งของรูปที่ 2.30 และ 2.31 จะแสดงเฟสของแข็งชนิดต่างๆ จะเกิดขึ้นตามอุณหภูมิและความดันย่อย P_{O_2} ที่ระบุในแผนภาพเฟส ส่วนเส้นตรงในแนวนอนมีความหมายได้ 2 แบบคือ แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้นกับเฟสทั้งหลายหรือไม่ก็มีการเปลี่ยนแปลงแบบครั้งเดียว (monovariant) ที่เกิดขึ้นกับเฟสของแข็ง 3 เฟส และกับเฟสสถานะแก๊สอีก 1 เฟส ตัวอย่างเช่นในแผนภาพเฟสของเจคอบและอัลคอก (Jalob and Alcock) ดังรูปที่ 2.30 ที่สภาวะสมดุลระหว่างเฟสของแข็ง 3 เฟส ซึ่งได้แก่ $\text{CuAl}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CuAlO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย $P_{\text{O}_2} = 0.21 \text{ atm}$ จะเกิดที่อุณหภูมิ 1172°C แต่สำหรับในรูปที่ 2.31ก. ซึ่งเป็นแผนภาพเฟสของเกดัลลาและไวท์ (Gadalla and White) สภาวะสมดุลระหว่าง $\text{CuAl}_2\text{O}_4 + \text{CuAlO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1200°C ซึ่งสูงกว่าในแผนภาพเจคอบและอัลคอก เท่ากับ 28°C

เมื่อความดันย่อย P_{O_2} เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 atm ดังรูปที่ 2.31ข. สภาวะสมดุลของการเกิดร่วมกันระหว่างเฟสของแข็งจำนวน 3 เฟส กับเฟสของเหลว 1 เฟส จะปรากฏที่อุณหภูมิ 1250°C ส่วนในรูปที่ 2.31ก. การเกิดร่วมกันของเฟสของแข็ง 3 เฟส กับเฟสของเหลว 1 เฟส จะปรากฏที่อุณหภูมิ 1227°C ซึ่งอุณหภูมิของแผนภาพเฟสของเจคอบและอัลคอกจะสูงกว่าอุณหภูมิของแผนภาพเฟสเกดัลลาและไวท์เท่ากับ 39°C

จากการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์จะได้ว่าที่ความดันย่อย $P_{\text{O}_2} = 0.21 \text{ atm}$ CuO จะสลายตัวเป็น Cu_2O ที่อุณหภูมิประมาณ 1028°C และเฟสผสมระหว่าง $\text{CuAlO}_2 + \text{CuO}$ จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 1005 ถึง 1028°C ดังรูปที่ 2.31ข. แต่ถ้าความดันย่อย P_{O_2} เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 atm เฟส CuO จะสลายตัวเป็น Cu_2O ที่อุณหภูมิ 1055°C ถึง 1062°C กล่าวคือเมื่อความดันย่อย P_{O_2} เพิ่มขึ้นจาก 0.21 atm เป็น 0.4 atm แล้วเฟสผสม $\text{CuAlO}_2 + \text{CuO}$ จะปรากฏในช่วงอุณหภูมิที่แคบลงคือลดจาก 23°C เป็น 7°C จากแผนภาพเฟสของเกดัลลาและไวท์ (ดังรูปที่ 2.30ก.) แสดงให้เห็นว่าในช่วง

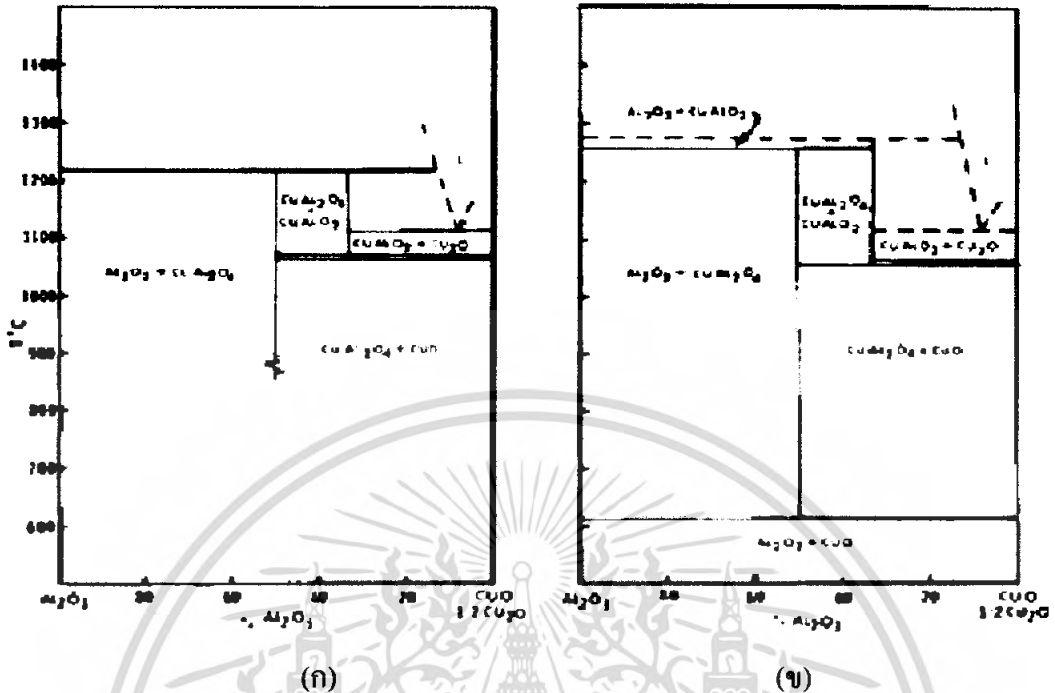
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 1021 - 1028°C เฟส CuAlO_2 จะสลายตัวเป็นเฟส CuAl_2O_4 และ Cu_2O ส่วนแผนภาพเฟสของเจคอบและอัลคอก (ดังรูปที่ 2.30ข.) จะไม่ปรากฏเฟสผสมนี้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว



รูปที่ 2.30 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย P_{O_2} เท่ากับ 0.21 atm ซึ่ง
 ก. ได้จากผลงานของเกดัลลาและไวท์
 ข. ได้จากผลงานของเจคอบและอัลคอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แสดงแผนภาพเฟสของระบบ $\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ความดันย่อย P_{O_2} เท่ากับ 0.4 atm ซึ่ง
 ก. ได้จากผลงานของเกดัลลาและไวท์
 ข. ได้จากผลงานของเจคอบและอัลคอก

2.6 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction : VRH) (งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2530)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องมักจะแบ่งง่าย ๆ เป็น 2 ช่วงดังนี้คือ

$$\sigma = \sigma_{ext} + \sigma_{hop} \tag{2.115}$$

เมื่อ σ_{ext} จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะที่อยู่ในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ซึ่งแถบนำและแถบวาเลนซ์จะเป็นสถานะพลังงานที่ต่อเนื่อง (extended state) การนำไฟฟ้าชนิดนี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ไม่ต่ำมากนักซึ่งสามารถที่จะแสดงอยู่ในรูปของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius relation) ได้ดังนี้คือ

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \tag{2.116}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

E คือ พลังงานกระตุ้นมีหน่วยเป็น eV

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

ส่วนกรณีสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง พาหะที่ไหลจะต้องข้ามกำแพงศักย์ของแต่ละเกรน ดังนั้น สมการอาร์เรเนียสสามารถเขียนใหม่ได้เป็นกฎของซีโต (Seto's law) ดังนี้คือ

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left(\frac{-E_b}{kT}\right) \quad (2.117)$$

เมื่อ E_b คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนมีหน่วยเป็น eV

สำหรับ σ_{hop} จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (localized state) ซึ่งเป็นสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้านี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติจะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{T_0^{\frac{1}{4}}}{T}\right] \quad (2.118)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0^{\frac{1}{4}}}{T}\right] \quad (2.119)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.120)$$

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.120) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยความชันของกราฟ คือ $(-T_0)^{\frac{1}{4}}$ ส่วน $\ln \sigma_0$ คือจุดตัดแกน $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ ที่จุด $T^{-\frac{1}{4}} = 0$ โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_0 = 3e^2 \nu \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.121)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.122)$$

เมื่อ ν คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} Hz

$N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (density of localized states at Fermi level)

α คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)

E คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} C

K คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T_0 คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการ (2.121) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

$$\sigma_0^2 = 9e^4 \nu^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.123)$$

เอาสมการ (2.123) คูณกับสมการ (2.122) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 \nu^2}{4\pi k^2} \quad (2.124)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 \nu^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.125)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi k}}{9e^2 \nu} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.126)$$

เมื่อความถี่โฟนอน (ν) = 1×10^{13} Hz ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความถี่โฟนอน (ν) = 1×10^{13} Hz ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23\sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.127)$$

ถ้าแทนสมการ(2.126) ลงใน (2.122) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^{\frac{3}{2}} k^2}{81e^6 \nu^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.128)$$

$$= (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.129)$$

ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น cm และพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy : W) มีหน่วยเป็น eV จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.130)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.131)$$

ส่วนกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง CuAlO_2 จะแสดงพฤติกรรมการนำไฟฟ้าแบบโพลารอนขนาดเล็ก (small polaron conduction) กล่าวคือ สภาพการนำไฟฟ้าของ CuAlO_2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่สัมประสิทธิ์ซีเบกจะมีค่าไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ การนำไฟฟ้าแบบโพลารอนขนาดเล็กสามารถเขียนได้ถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T} \exp\left(\frac{-E_H}{kT}\right) \quad (2.132)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเท่ากับ $2.43 \times 10^4 \text{ S.cm}^{-1} \cdot \text{K}$ ส่วนสัมประสิทธิ์ซีเบกของการนำไฟฟ้าแบบโพลารอนขนาดเล็ก คือ

$$S = \pm \frac{k}{e} \ln \left[\frac{2(1-c)}{c} \right] \quad (2.133)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\frac{k}{e}$ เท่ากับ $86.14 \mu\text{V/K}$

C คือ เศษส่วนของตำแหน่งที่โฮลเข้าไปครอบครอง (fraction of site occupied by hole)

1-C คือ ตำแหน่งที่พร้อมจะให้โฮลกระโดดไปครอบครอง

เลข 2 คือ สถานะของสปินของพาหะ (spin degeneracy)

ในกรณีแบบจำลองโพลาโรนที่สัมพันธ์กับ Cu^{2+} และ Cu^+ จะมีค่า C เท่ากับ 1.21×10^{-2} และ 3.02×10^{-3} ตามลำดับ ตำแหน่งของ Cu ที่มีอยู่ใน CuAlO_2 จะเท่ากับ $2.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ดังนั้นความหนาแน่นของโฮลที่สัมพันธ์กับ Cu^{2+} และ Cu^+ จะเท่ากับ $3.02 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และ $7.56 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีปริมาณสารเจือปนกลาง และเป็นชนิดเอ็นสัมประสิทธิ์ซีเบกจะแสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{k}{e} \left(\frac{E_c - E_F}{kT} + r + \frac{5}{2} \right)$$

หรือ

$$S = \frac{k}{e} \left(\frac{E_s}{kT} + A \right)$$

(2.134)

เมื่อ

$$E_s = E_c - E_F$$

โดยที่ E_s คือ พลังงานกระตุ้นกำลังความร้อน (thermopower activation energy)

r และ A เป็นค่าคงที่

ถ้าการเคลื่อนที่ของพาหะเกิดขึ้นในแถบพลังงานกระตุ้นของสภานำไฟฟ้า (conductivity activation energy : E_σ) ควรจะมีค่าเท่ากับพลังงานกระตุ้นกำลังความร้อน (E_s) ในลักษณะตรงกันข้าม ถ้าพาหะมีการเคลื่อนที่แบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ แล้ว E_σ จะมีค่าสูงกว่า E_s และผลต่างของ E_σ กับ E_s ก็คือพลังงานกระตุ้นของการกระโดด (W_H) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

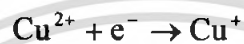
$$E_\sigma = E_s + W_H \quad (2.135)$$

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง การนำไฟฟ้าของโฮลใน CuAlO_2 ที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับ Cu^{2+} ที่ปรากฏขึ้นในโครงผลึก

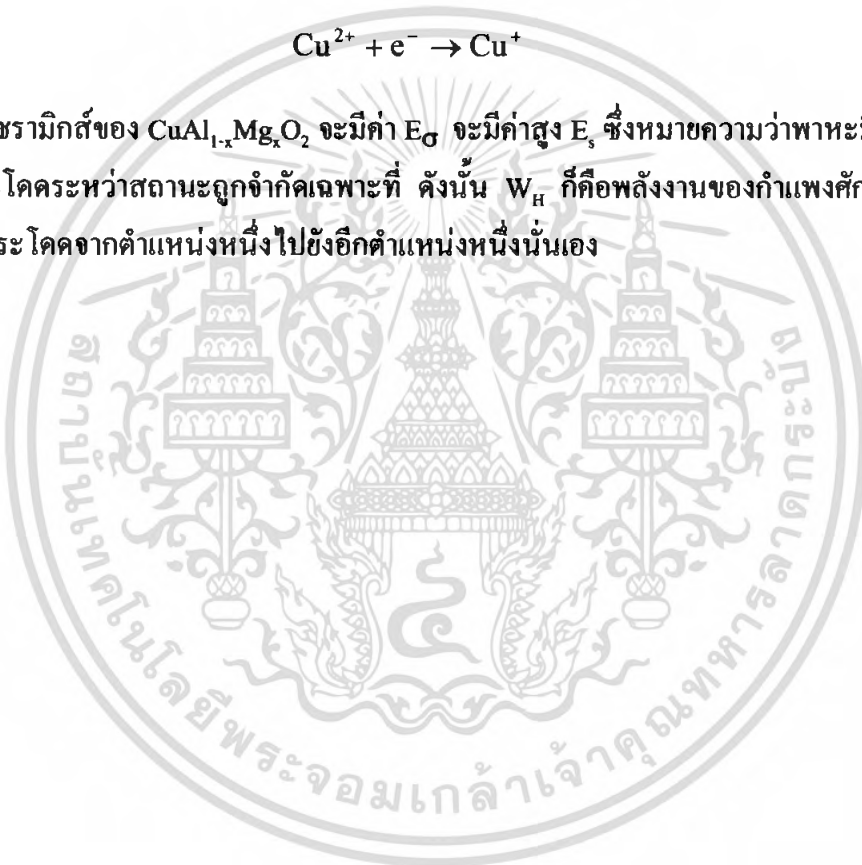
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพลังงานความร้อนจะส่งผลให้ Cu^+ ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกไปดังสมการ



ดังนั้นการนำไฟฟ้าแบบโพลารอนขนาดเล็ก จะเกี่ยวข้องกับการเกิดโฮลชนิด Cu^{2+} (Cu^{2+} hole) จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะถูกจับไว้ที่ตำแหน่งของไอออน Cu^+ ดังความสัมพันธ์



สำหรับเซรามิกส์ของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ จะมีค่า E_σ จะมีค่าสูง E_g ซึ่งหมายความว่าพาหะมีการเคลื่อนที่แบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ ดังนั้น W_H ก็คือพลังงานของกำแพงศักย์ที่โพลารอนจะต้องกระโดดจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งนั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ในรูปแบบที่เป็นเซรามิกส์ ซึ่งจะได้อธิบายถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก (ฐิตินัย, 2530)

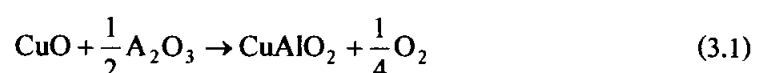
มีวิธีดำเนินการทดลองดังนี้

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

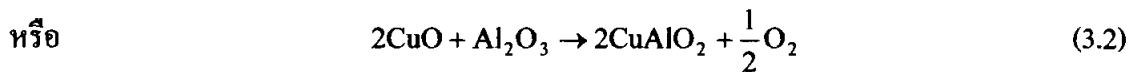
- สารตั้งต้น
 1. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)
 2. อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
 3. แมกนีเซียมไนเตรด ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
- ครกอาเกต
- ชุดเครื่องมืออัดเม็ด
- เครื่องอัดเม็ดสาร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
- เตาเผาสาร
- กรูซิบิล

3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

เราจะใช้ CuO ร่วมกับ Al_2O_3 ให้ได้ CuAlO_2 1 กรัมมีวิธีในการคำนวณดังนี้ จากสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ดังนั้นจะได้ว่า

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

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.5[2(26.9815) + 3(15.994)] \\ &= 0.5(101.9612) \\ &= 50.9806 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

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

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

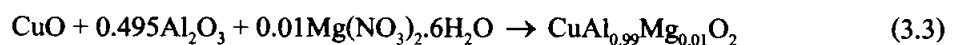
$$\text{CuO} = \frac{79.5454}{122.5263} \text{ g/mol}$$

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

$\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) จะแสดงการคำนวณที่กรณีเจืออะตอมของธาตุ Mg ที่ $x=1$ เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของธาตุ Al จากสมการ



ดังนั้นจะได้ว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\begin{aligned}
 0.01\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 0.01[24.312 + 2[14.0067 + 3(15.9994)] + 108.09204] \\
 &= 0.01[24.312 + 2(62.0049) + 108.09204] \\
 &= 0.01[24.312 + 124.0098 + 108.09204] \\
 &= 0.01(256.41384) \\
 &= 2.5641 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2 &= 63.546 + 0.99(26.9815) + 0.01(24.312) + 2(15.9994) \\
 &= 63.546 + 26.711685 + 0.24312 + 31.998 \\
 &= 122.499605 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

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 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

| Composition (x) | CuO (g/mol) | Al ₂ O ₃ (g/mol) | Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (g/mol) |
|-----------------|-------------|--|--|
| 0.00 | 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 วิธีการเตรียมเซรามิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

- 3.1.3.1 นำผงผลึก CuO และ Al₂O₃ ตามปริมาณที่ต้องการนำมาบดรวมกันในครกอาเกตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3.1.3.2 การเจืออะตอมของธาตุ Mg จะทำการเจือในปริมาณ 1, 5, 10, 15, และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับอะตอมของธาตุ Al โดยที่ในการบดสารจะทำเช่นเดียวกับข้อ 3.1.2.1
- 3.1.3.3 เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดโดยจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 2 ตัน
- 3.1.3.4 นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ในครุชเชิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
- 3.1.3.5 ในการเผา นั้นจะใช้อุณหภูมิในการเผา 1,100 องศาเซลเซียส โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิทีละ 100 องศาเซลเซียสต่อ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ในรูปแบบที่เป็นเซรามิกส์ (ฐิตินัย, 2530)

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาสมบัติต่างๆดังนี้

3.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

3.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

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

3.2.3 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

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

3.2.4 การศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

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

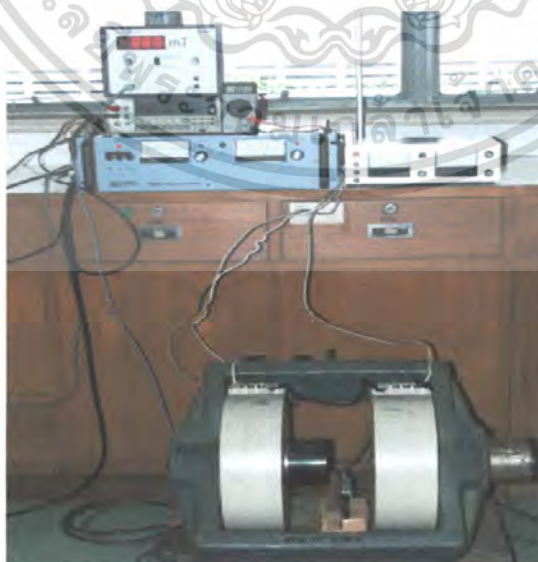
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

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

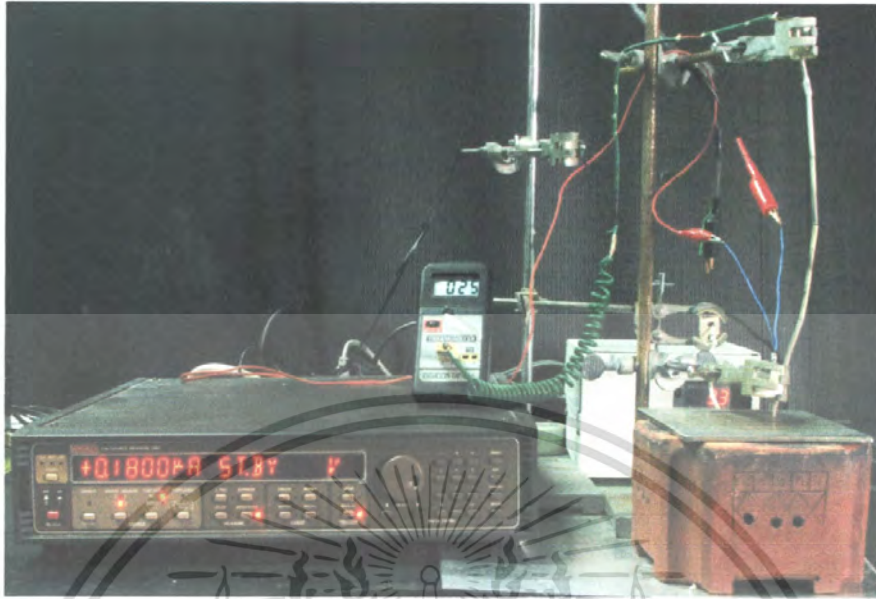
3.2.6 การศึกษาปรากฏการณ์ของซีเบก

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

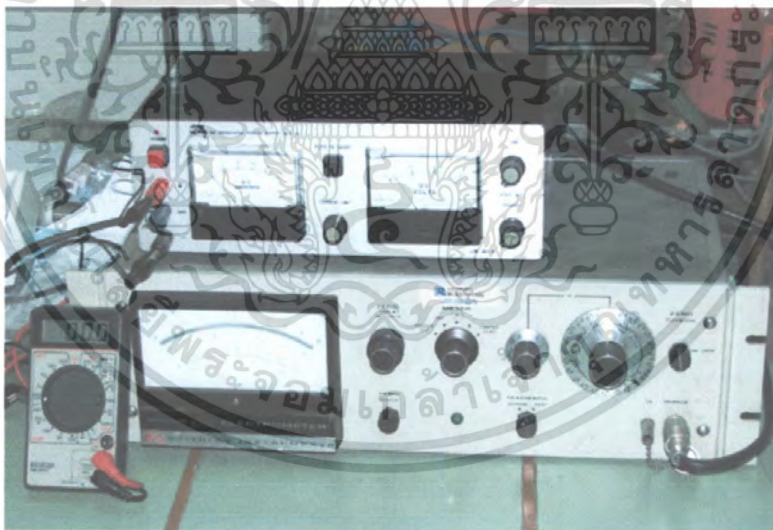


รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ในรูปของเซรามิกส์เราได้มีการปรับปรุงสมบัติต่างๆของสารกึ่งตัวนำโดยมีการเจืออะตอมของแมกนีเซียม และมีการเพิ่มอะตอมของออกซิเจนเข้าไปโดยจุดประสงค์หลักแล้วคือต้องการเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าและเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากซึ่งคือ โฮลนั่นเอง

4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

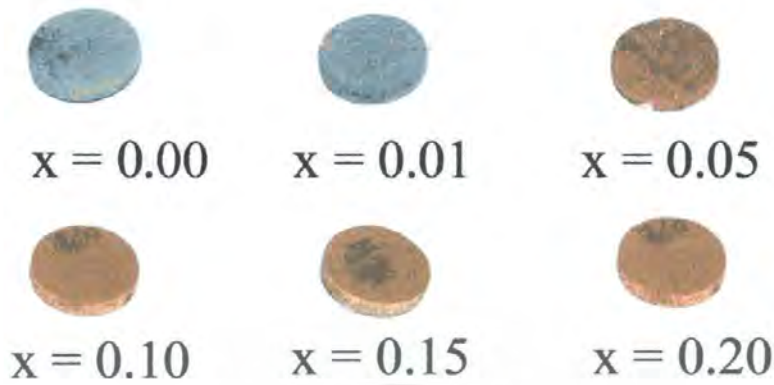
4.1.1 เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

เซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีดำแต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนสีเป็นเขียวแกมฟ้าในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ และ จะมีสีแดงแกมส้มในช่วง $0.05 \leq x \leq 0.20$



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

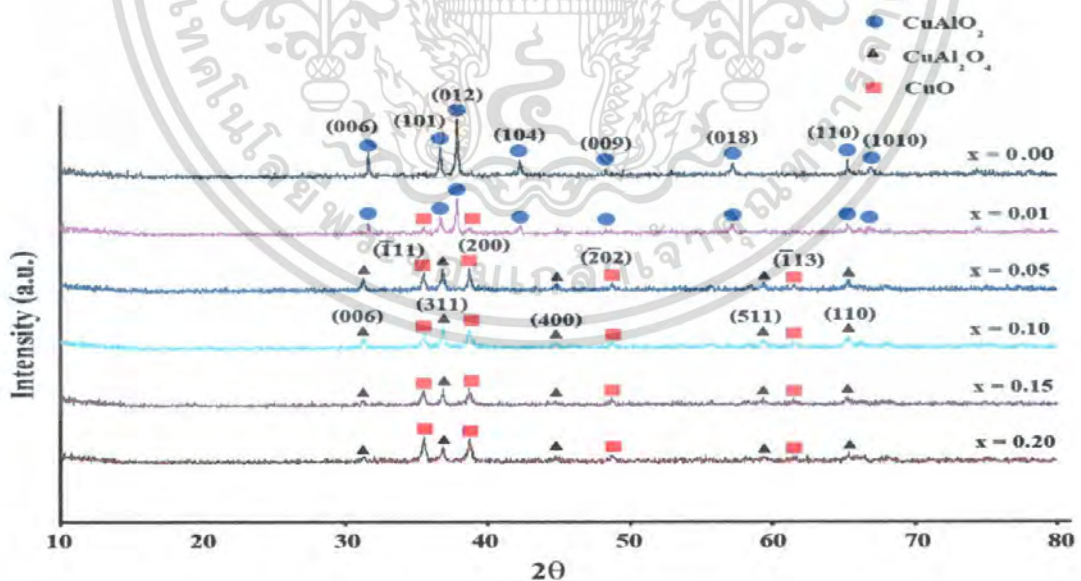
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดใดและมีโครงสร้างแบบใด



รูปที่ 4.3 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ จะพบเฟสของ CuAlO_2 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตลาฟอสไซท์ 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 $2\theta \approx 65^\circ$ (101) 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 $0.05 \leq x \leq 0.20$ จะไม่ปรากฏเฟสของ CuAlO_2 แต่จะปรากฏเฟส CuO และ CuAl_2O_4 ขึ้นแทน แต่จะไม่พบเฟสของ MgO

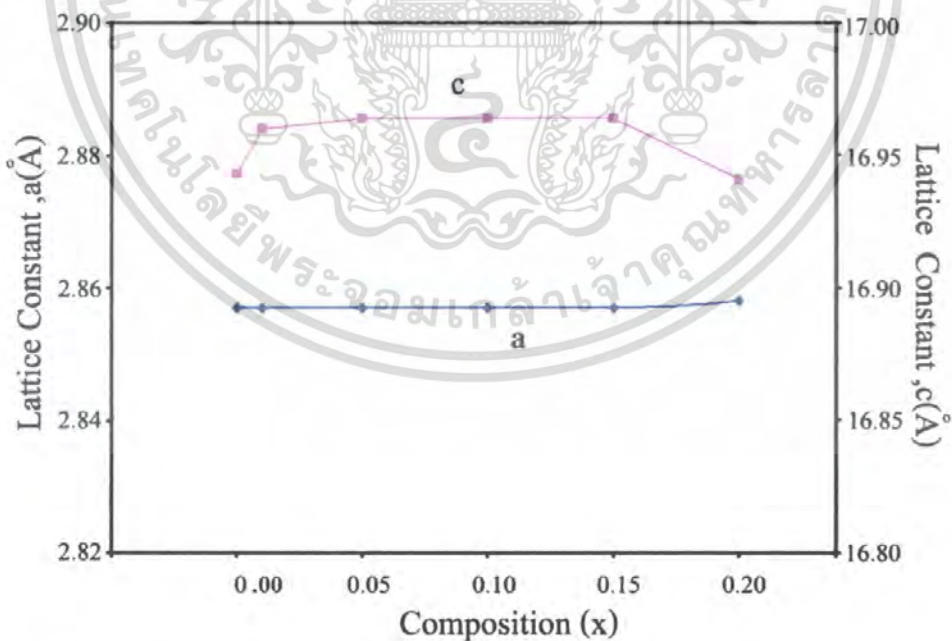
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของเกรนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | Grain size (nm) |
|-----------------|-----------------|
| 0.00 | 80 |
| 0.01 | 95 |
| 0.05 | 211 |
| 0.10 | 150 |
| 0.15 | 232 |
| 0.20 | 299 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | Lattice Constant (Å) | | c/a |
|-----------------|----------------------|--------|-------|
| | A | C | |
| 0.00 | 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 |

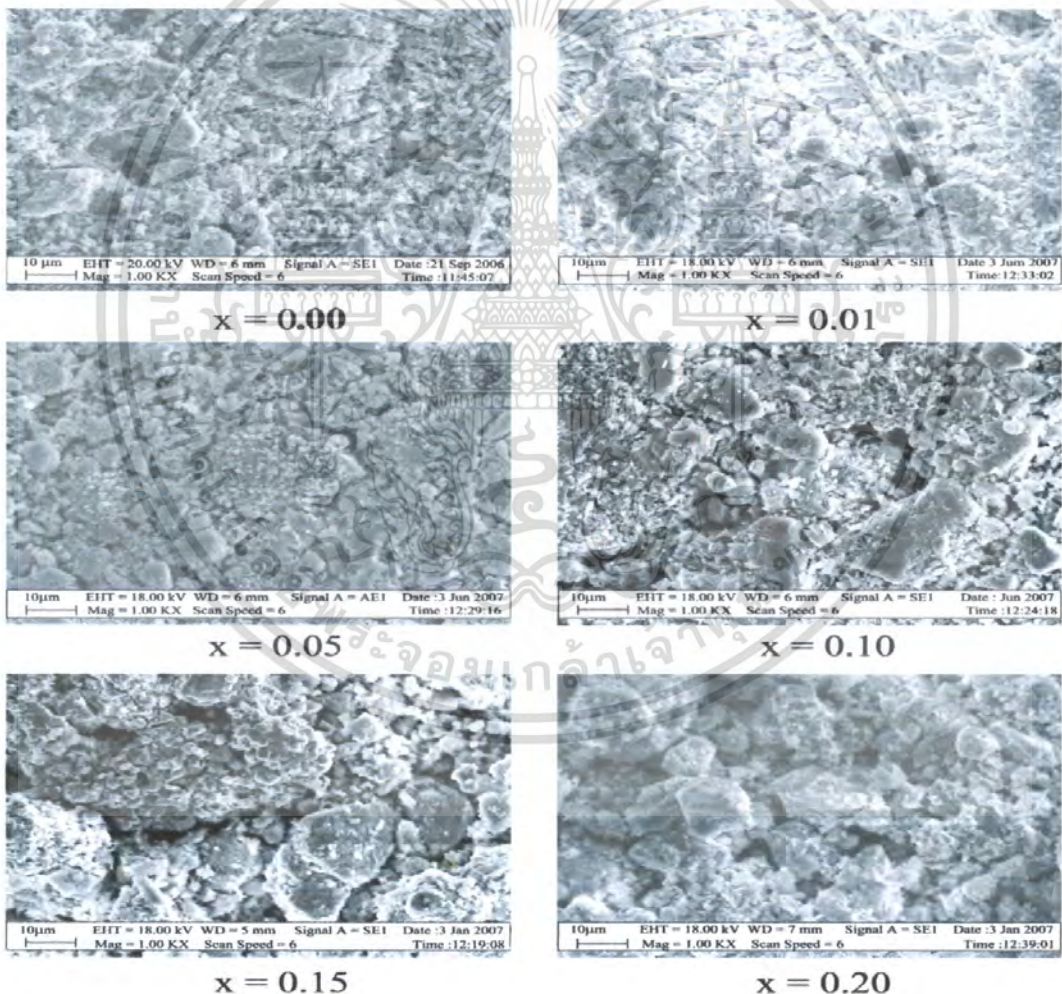


รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับปริมาณของอะตอม Mg ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าคงที่ของผลึก a และค่าคงที่ของผลึก c เทียบกับปริมาณอะตอม Mg โดยที่ค่าคงที่ของผลึก a ที่ปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง $0 \leq x \leq 0.15$ จะมีค่าคงที่ แต่ที่ 0.20 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 $0.15 \leq x \leq 0.20$ ค่าคงที่ของผลึก c จะมีค่าลดลง

4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.5 แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

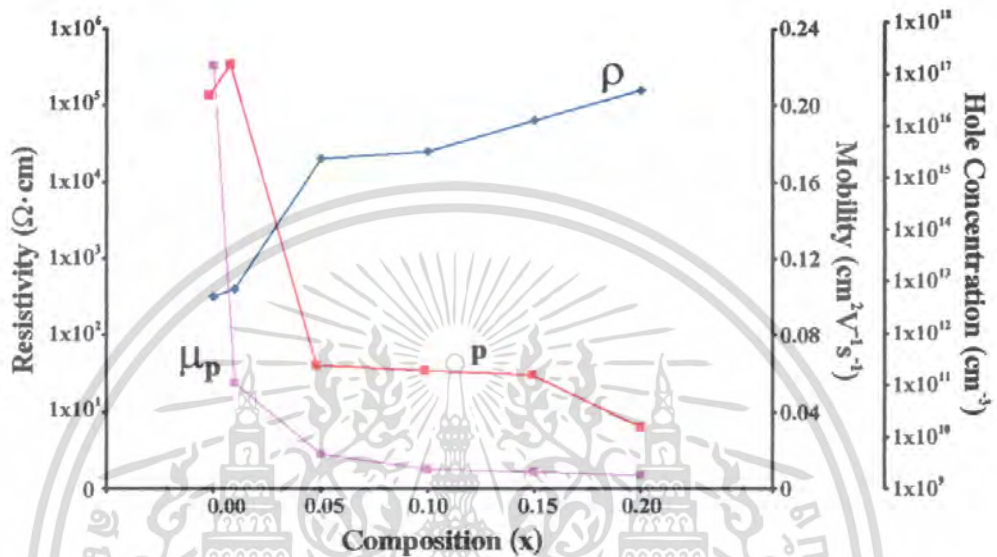
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงลิก

| Composition (x) | Relative Density (%) |
|-----------------|----------------------|
| 0.00 | 54.71 |
| 0.01 | 53.61 |
| 0.05 | 52.45 |
| 0.10 | 52.38 |
| 0.15 | 52.36 |
| 0.20 | 51.32 |

จากรูปแสดงภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือของอะตอม Mg เพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้นและขณะเดียวกันช่องว่างระหว่างเกรนก็มีขนาดที่เพิ่มขึ้นด้วย และจากตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ลดลงตามปริมาณสารเจือ

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

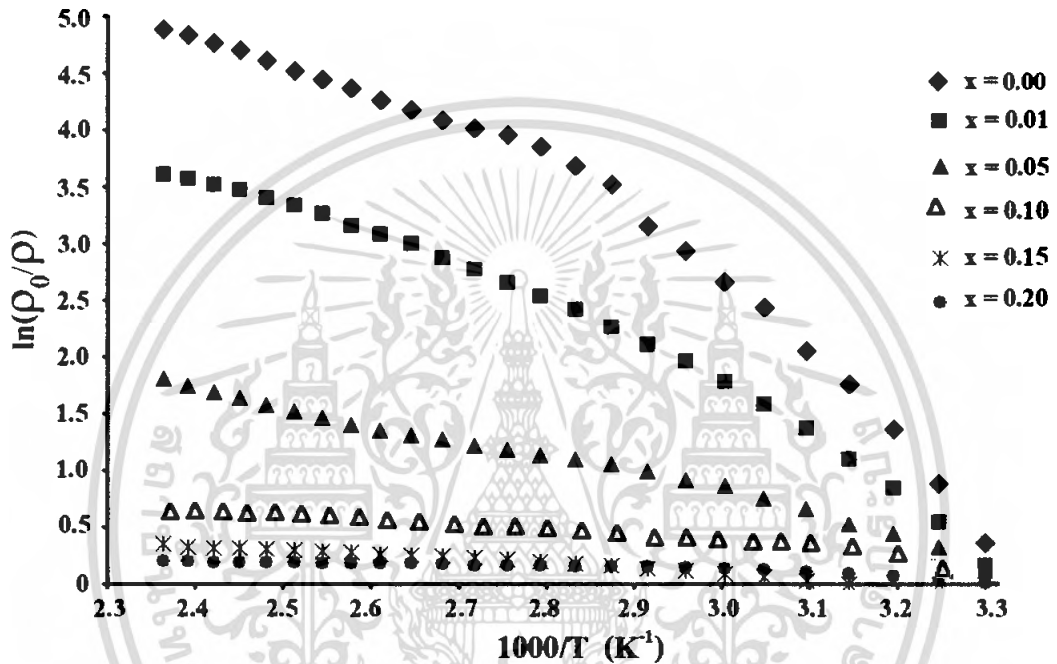


รูปที่ 4.6 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) สภาพคล่องของโฮล (μ_p) และความหนาแน่นของโฮล (p) ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ความหนาแน่นของโฮล (p) และสภาพคล่องพาหะ (μ_p) ของเซรามิกส์ของสารประกอบ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | Hole Concentration (cm^{-3}) | Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) | Resistivity ($\Omega\text{-cm}$) |
|-----------------|---|--|------------------------------------|
| 0.00 | 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 |

จากภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าปริมาณการเจือของอะตอม Mg ในช่วง $0 \leq x \leq 0.01$ ค่าความหนาแน่นของโหนดนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสภาพคล่องมีค่าลดลง และค่าสภาพต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่ $0.01 \leq x \leq 0.20$ ค่าความหนาแน่นของโหนดมีค่าลดลง ค่าสภาพคล่องมีค่าลดลง และค่าสภาพความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ตารางที่ 4.5 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | 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 | - | - |
| Point 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 4.5 ในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Mg ที่ $0 \leq x \leq 0.01$ จะเกิดระดับพลังงาน 2 ระดับคือ ระดับพลังงานของ V_{Cu} และระดับพลังงาน V_{Al} แต่เมื่อมีการเจืออะตอมของ Mg เพิ่มขึ้นนั้น ระดับพลังงานทั้งสองจะหายไป และจะเกิดระดับพลังงาน O_i ขึ้นแทน

4.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียม โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (80 -280 K)

พารามิเตอร์ที่สำคัญของ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือ (x) ของ Mg เพิ่มขึ้นส่งผลให้ T_0 มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งบอกลักษณะของความไม่เป็นระเบียบมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ Mg เข้าแทนที่ในตำแหน่งของ Cu เป็นแบบสุ่ม ส่วนค่า σ_0 หาได้จากการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับกราฟแล้วให้ไปตัดแกนตั้ง $\ln \sigma T^{\frac{1}{4}}$ (โดยที่แกนนอน $\frac{1}{T^{\frac{1}{4}}}$ มีค่าเท่ากับ 0)

จากนั้นความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (N_E) จะคำนวณได้จากการสมการ

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$$

โดยเลือกให้ $\alpha = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$

และ

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha kTN(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

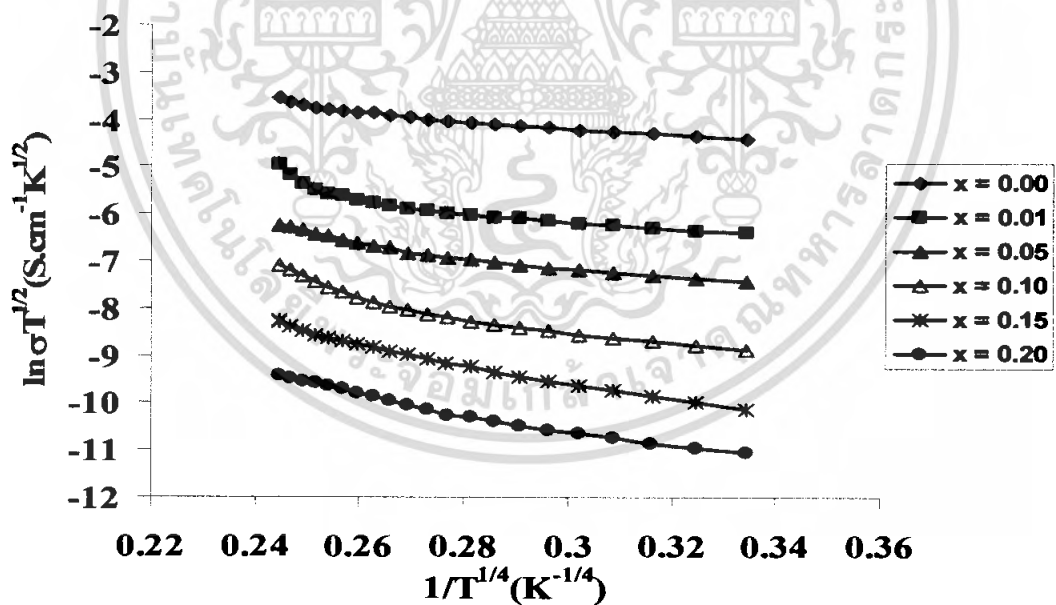
เมื่อ T คืออุณหภูมิตรงบริเวณที่เกิดจากการเปลี่ยนจากกลไกการนำไฟฟ้าแบบซีโด (Seto's law) เป็นการนำไฟฟ้าแบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่และพลังงานเฉลี่ยของการกระโดดจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$W = \frac{3}{4TR^3N(E_F)}$$

เมื่อปริมาณสารเจือ Mg เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ $N(E_F)$ มีค่าลดลง แต่ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดดจะมีค่าเพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 จะเกิดขึ้นในชั้น Cu-O ซึ่งอยู่ในระนาบ ab ของโครงผลึกแบบเตลาฟอสไซท์ การที่ Mg เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Cu จะส่งผลให้ระยะของ Cu ที่อยู่ใกล้เคียงกันเพิ่มขึ้น ดังนั้น พลังงานเฉลี่ยของการกระโดดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

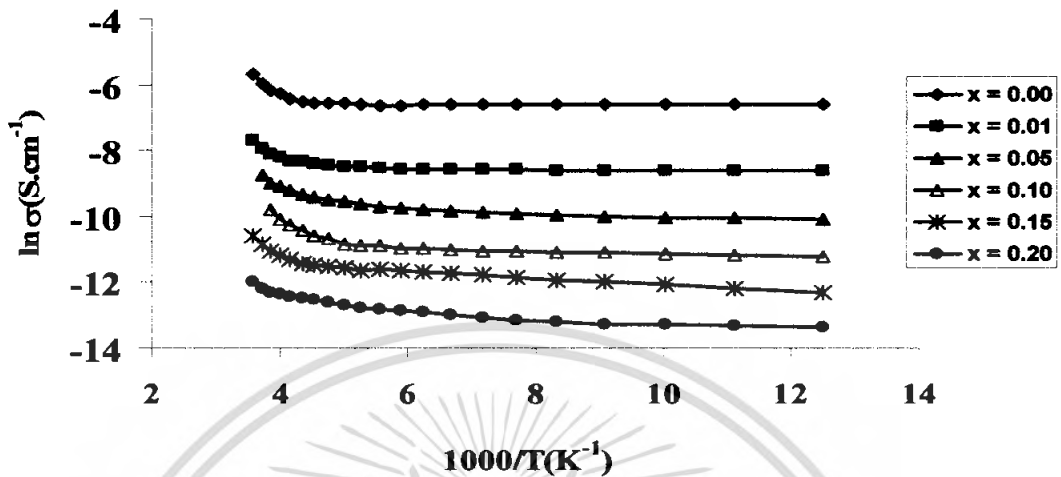
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ T_0 (K), σ_0 (S.cm⁻¹), $N(E_F)$ (cm⁻¹.eV⁻¹), R (cm), αR และ W ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | T_0 (K) | σ_0 (S.cm ⁻¹) | $N(E_F)$ (cm ⁻¹ .eV ⁻¹) | R (cm) | αR | W (meV) |
|-----------------|--------------------|----------------------------------|--|-----------------------|------------|-----------|
| 0.00 | 1.28×10^3 | 2.27×10^{-1} | 1.63×10^{23} | 6.80×10^{-8} | 0.68 | 4.66 |
| 0.01 | 3.10×10^3 | 6.44×10^{-2} | 6.74×10^{22} | 8.48×10^{-8} | 0.85 | 5.81 |
| 0.05 | 9.84×10^3 | 4.15×10^{-2} | 2.12×10^{22} | 1.13×10^{-7} | 1.13 | 7.81 |
| 0.10 | 1.28×10^4 | 1.55×10^{-2} | 1.63×10^{22} | 1.21×10^{-7} | 1.21 | 8.27 |
| 0.15 | 3.10×10^4 | 1.01×10^{-2} | 6.74×10^{22} | 1.51×10^{-7} | 1.51 | 10.29 |
| 0.20 | 2.78×10^5 | 2.17×10^{-3} | 7.52×10^{28} | 2.61×10^{-7} | 2.61 | 17.86 |



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $1/T^{1/4}$ ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าเมื่อเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงสลิค เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (80 – 280 K)

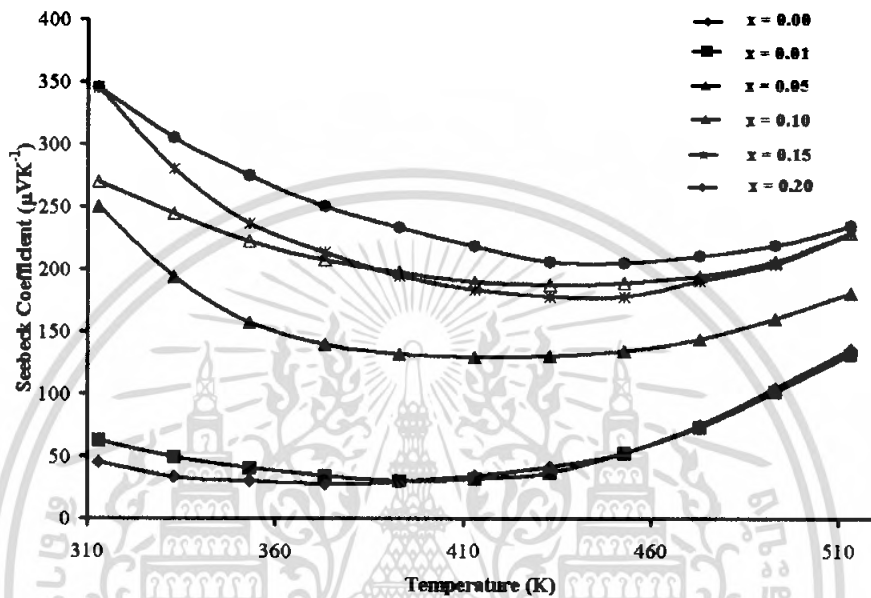
ตารางที่ 4.7 แสดงพลังงานกระตุ้นของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงสลิคเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (80 – 280K)

| Composition (x) | Activation Energy (meV) |
|-----------------|-------------------------|
| 0.00 | 273 |
| 0.01 | 246 |
| 0.05 | 245 |
| 0.10 | 129 |
| 0.15 | 92 |
| 0.20 | 52 |

จากตาราง 4.7 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณการเจือที่ $0 < x \leq 0.05$ ระดับพลังงานกระตุ้นจะมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณการเจือที่ $0.05 < x \leq 0.20$ ระดับพลังงานกระตุ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น

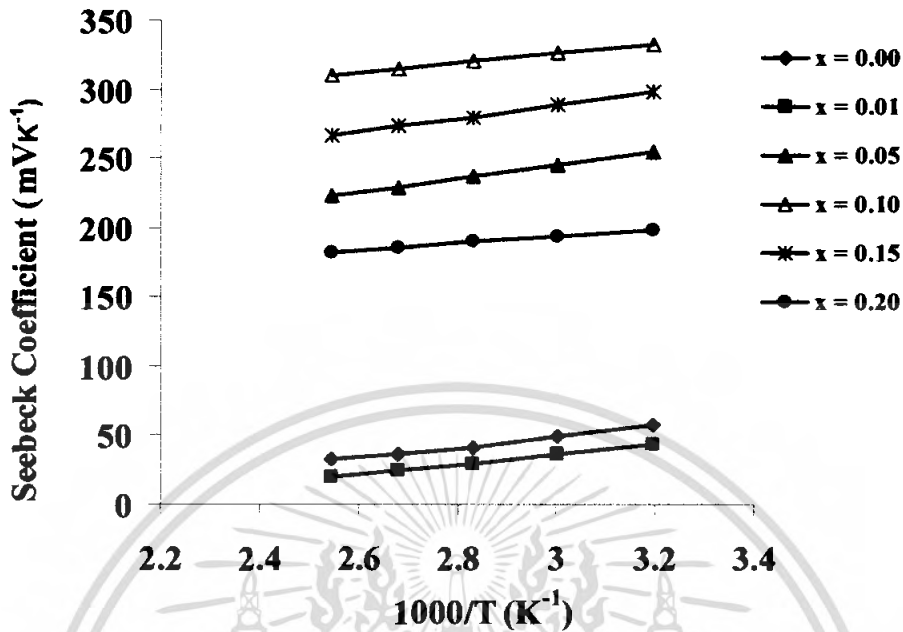
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ สัมประสิทธิ์ของซีเบกที่ปริมาณ x เท่ากับ 0.00 มีค่าประมาณ $150 \mu\text{V/K}$ และที่ค่า x มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบกจะมีลักษณะเช่นเดียวกันคือจะมีค่าลดลงจากช่วงอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 100°C และจะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบกเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า W_H ของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

| Composition (x) | E_G (meV) | E_S (meV) | W_H (meV) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.00 | 260 | 45 | 215 |
| 0.01 | 216 | 35 | 181 |
| 0.05 | 200 | 55 | 145 |
| 0.10 | 40 | 36 | 4 |
| 0.15 | 48 | 44 | 4 |
| 0.20 | 32 | 31 | 1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานตั้งแต่ขั้นเตรียมสารตัวอย่างในแบบของเซรามิกส์ จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของสารตัวอย่าง รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง อีกทั้งยังได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการทดลองของเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่เตรียมได้ โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ที่เตรียมได้เป็นเฟสเดี่ยวที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไซท์ สเปซกรุ๊ป $R\bar{3}m$ หน่วยเซลล์เป็นแบบเฮกซะโกนอลที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c เท่ากับ 2.857 และ 16.943 Å ซึ่งสอดคล้องกับไฟล์ JCPDS No.35-1401 แต่สำหรับเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) ที่มีการเจืออะตอม Mg เข้าไปในโครงสร้างผลึกของ CuAlO_2 พบว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.00 ถึง 0.05 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่วนค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน a ค่อนข้างคงที่ แสดงว่าไอออน Mg^{2+} ได้เริ่มเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ ซึ่งโครงสร้างผลึก CuAlO_2 มักจะมี V_{Cu} ปรากฏอยู่เสมอ 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 (Stauber;et.al.2000) ได้รายงานไว้ในฟิล์มบางของ $\text{CuAlO}_2:\text{Mg}$ ก่อนหน้านี้แล้ว

สำหรับ $0 \leq x \leq 0.15$ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกแกน c และ แกน a มีค่าเกือบคงที่แต่พิการเลี้ยวเบนของเฟส 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+} ได้บ้างแต่ที่ปริมาณของเฟส CuO และ CuAl_2O_4 มีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จากโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไซท์ ชั้นของคัมเบลของ O-Cu-O จะวางตัวอยู่ในแนวแกน c ส่วนชั้นของออกทระฮีดรัล AlO_6 ที่มีขอบเชื่อมติดกัน (edge-sharing octahedral) จะขนานกับระนาบ ab โดยที่ชั้นของคัมเบล O-Cu-O กับชั้นของออกทระฮีดรัลจะวางตัวในลักษณะสลับชั้นกันตามแนวแกน c ได้ 2 แบบ คือแบบ

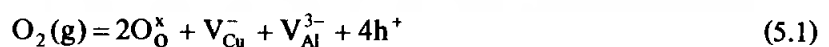
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AaBbAaBb ซึ่งเรียกว่าชนิด 2H (2H-polytype) กับแบบ AaBbCcAaBbCc ซึ่งเรียกว่าชนิด 3R (3R polytype) การที่ Mg^{2+} เข้าไปแทนที่ใน V_{Cu} จะทำให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน c มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ Mg^{2+} เพิ่มขึ้นถึง $x = 0.15$ แล้ว Mg^{2+} จะเริ่มเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} ได้บ้างจึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน a มีค่าเพิ่มขึ้นบ้าง เนื่องจากชั้นของออกไซด์คริสตัล AlO_6 วางตัวอยู่ในระนาบ ab แต่หน่วยเซลล์ของ $CuAlO_2$ เป็นระบบบรอมโบฮีดรัลคิงนั้น $a = b$ และรัศมีของ Mg^{2+} ใหญ่กว่ารัศมีของ Al^{3+} มากเมื่อ Mg^{2+} แทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} จึงส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างแกน a มีค่าเพิ่มขึ้น

จากภาพถ่าย SEM ของเซรามิกส์ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้นเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นในลักษณะที่แต่ละเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้นแต่ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเซรามิกส์จะมีค่าลดลง แสดงว่าเซรามิกส์มีรูพรุนมากเมื่อปริมาณ x เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซรามิกส์ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) เมื่อปริมาณสารเจือ Mg^{2+} เพิ่มขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจากปรากฏการณ์ฮอลล์พบว่าเมื่อ x เพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโฮล และ สภาพคล่องพาหะมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารเจือ Mg^{2+} ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฮลลดลง

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเดลตาฟอสไฟท์ สภาพนำไฟฟ้าจะอยู่ขึ้นกับสัดส่วนของเคมีของอะตอมที่ต่างไปจากกรณีอุดมคติหรือที่เรียกว่า นอนสโตอิชิโอเมตรี (nonstoichiometry) ซึ่งจะก่อให้เกิดข้อบกพร่องชนิดจุด (point defects) ในหลายๆ แบบ เช่น อะตอมโลหะของโครงสร้างขาดหายไป (metal deficit) และการเติมอะตอมออกซิเจนส่วนเกินเข้าไปในโครงสร้างซึ่งเรียกว่า กระบวนการนี้ว่า อินเตอร์เคเลชัน (intercalation) หรือกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งข้อบกพร่องทั้ง 2 แบบดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับอะตอมออกซิเจนส่วนเกินในโครงสร้าง ในกรณีที่มีอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากแวกแคนซีของ Cu และ Al จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์



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

ส่วนกรณีที่มีอะตอมออกซิเจนส่วนเกิน โดยกระบวนการอินเตอร์เคเลชันอะตอมออกซิเจนดังกล่าวจะปรากฏแทรกอยู่ระหว่างโครงสร้าง (O_i^{2-}) ดังความสัมพันธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



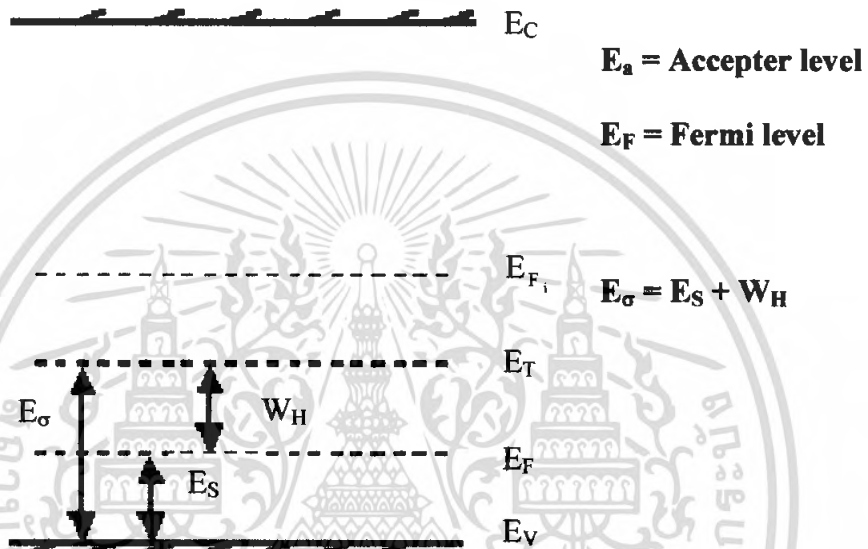
เมื่อ Mg_{Cu}^+ คือ ไอออน Mg^{2+} ซึ่งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของ Cu^+ ประจุสุทธิจึงเป็น +1 และ Mg_{Cu}^+ (ซึ่งประพฤติตัวเสมือนเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน) จะเหนี่ยวนำให้เกิด O_I^{2-} จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อปริมาณสารเจือ (x) ของ $CuAl_{1-x}Mg_xO_2$ มากกว่า 0.05 ขึ้นไปค่าพลังงานกระตุ้นของทุก ๆ สารตัวอย่างจะมีค่าใกล้เคียงกันจึงสรุปได้ว่า 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 ไอออนที่ติดอยู่กันแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าเท่ากับ 2.86 Å ซึ่งค่อนข้างสั้นกว่า Cu-Cu (3.02 Å) ในสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และรัศมีของ Al^{3+} ก็มีขนาดเล็กเกินไปดังนั้นจึงไม่มีที่ว่างมากพอที่จะทำให้เกิด O_I^{2-} ในชั้นของคัมเบล O-Cu⁺-O ได้ เซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $CuAlO_2$ ซึ่งมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าและความหนาแน่นของพาหะเท่ากับ $4.07 \times 10^2 \Omega \cdot cm$ และ $6.94 \times 10^{16} c m^{-3}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่รายงานโดย คาวาซุเอะ (Kawazoe) และเพื่อนร่วมงาน ส่วนสภาพคล่องพาหะมีค่าเท่ากับ $0.221 cm^2/Vs$ ซึ่งใกล้เคียงกับที่รายงานไว้โดย Marquardt และเพื่อนร่วมงาน แต่เมื่อปริมาณสารเจือ x เพิ่มขึ้นช่องว่างระหว่างเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีเฟส CuO และ $CuAl_2O_4$ ปะปนอยู่ด้วยส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่วนปริมาณความหนาแน่นของโฮลและสภาพคล่องของพาหะจะลดลง

สำหรับในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องค่าสภาพความนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ $CuAlO_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ $CuAlO_2$ ที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 50 $\mu V/K$ และจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิห้องถึง 100 °C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 °C สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อทำการเจือ Mg^{2+} เข้าไปในเซรามิกส์ของ $CuAlO_2$ สัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิห้อง จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ Mg^{2+} และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 350 $\mu V/K$ เมื่อปริมาณสารเจือ (x) เท่ากับ 0.20

สัมประสิทธิ์ซีเบกของเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับของเซรามิกส์ CuAlO_2 ที่ไม่มีการเจือ กล่าวคือที่ x ค่าใดๆ สัมประสิทธิ์ซีเบกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจากนั้นสัมประสิทธิ์ซีเบกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และอัตราการเพิ่มจะยิ่งช้าลงเมื่อ x มีค่าเพิ่มขึ้น

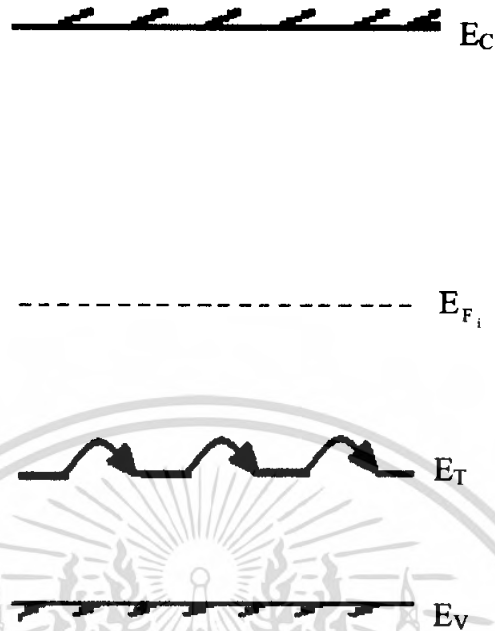


รูปที่ 5.1 แสดงระดับพลังงานผู้รับและระดับเฟอร์มิของเซรามิกส์ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$

กรณีที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง Cu^{1+} จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ ออกไปดังสมการ



จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะถูกจับที่กับดัก เกิดเป็น โพลารอนขนาดเล็ก (small polaron)



รูปที่ 5.2 แสดงการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานกับดักประจุ



ซึ่งในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง จะเกิด ไอออนทั้ง Cu^+ และ Cu^{2+} ปรากฏอยู่ในโครงผลึก และอิเล็กตรอนอิสระจะมีแรงดึงดูดกระทำกับไอออน Cu^+ และ Cu^{2+} ส่งผลให้โครงผลึกเกิดการผิดรูปชั่วขณะ ซึ่งเรียกอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออน Cu^+ และ Cu^{2+} นี้ว่า โพลารอนขนาดเล็ก (small polaron)

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกสารเจือชนิดอื่นๆ เช่น Ca เพื่อให้ไปแทนที่ในตำแหน่งของ Al
2. ควรวัดสัมประสิทธิ์ซีเบกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง
3. ควรศึกษาสมบัติของ CuAlO_2 ในกรณีที่เจือด้วยธาตุหมู่ 4 เพื่อให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น (n-type)

เอกสารอ้างอิง

- Banejee, A. N., Maity, R., Ghosh, P. K. and Chattopadhyay. 2005. Thermoelectric properties and electrical characteristics of sputter-deposited p-CuAlO₂ thin films. **Thin Solid Films**. 474: 261-266.
- Caballero, R. and Guillen, C. 2003. Optital and Electrical Properties of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ thin films obtained by selenization of sequentially evaporated metallic layers. **Thin Solid Films**. 431-432 : 200-204.
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-Ray Diffraction** . Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Dieter, K. S. 1998. **Semiconductor Material and Device Chracterization** 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Elangovan, E. and Ramamurthi, K. 2003. Optoelectronic properties of spray deposition SnO₂:F thin films for windows materials in solar cells. **J. Optoelect. Adv. Mat.** 5:45-54.
- Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H. 1983. **Fundamentals of Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion**. New York Academic Press Inc, p. 44.
- Gangopadhyay, U., Kim K., Mangalaraj, D., Yi J. 2004. Low cost CBD ZnS antireflection coating on large area commercial mono-crystalline silicon solar cells **Applied Surface Science**. 230: 364-370.
- Garadkar,K.M.;Hankare,P.P.and Patil R.K.1999. Effect of indium doping on structural, optical and electrical properties of Cd_{0.95}Hg_{0.05}S thin films. **Mater.Chem.Phys**.58: 64-70.
- Gunal,I.and Parlak,M.1997 Current transport mechanisms in law resistive CdS thin films. **J.Mater.Sci.Mater.Elec**.8:9-13.
- Hearle, J. W. S., Sparrow, J. T., and Cross, P. M. 1973. **The Use of the Scanning Electron Microscope**. New York: Pergamon Press Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ingram, B. J., Bertoni, M. I., Poepelmeir, K. R. and Mason, T. O. 2005. Point defects and transport mechanisms in transparent conducting oxides of intermediate conductivity. **Thin Solid Films**. 486: 86-93.
- Kawazoe, H., Yasukawa, M., Hyodo, H., Kurita, M., Yanagi, H., and Hosono, H. 1997. P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO_2 . **Nature**. 389: 39-942
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. New York: John.
- Marquardt, M.A., Ashmore, N.A. and Cann, D.P. 2006. Crystal chemistry and electrical properties of the delafossite structure. **Thin solid films**. 496: 146-156.
- Ohring M. 2002. **Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure**. 2nd ed. San Diego: ACADEMIC PRESS.
- Park, K., Ko, K. Y. and Seo, W. S. 2005. Thermoelectric properties of CuAlO_2 . **J. Eur. Ceram. Soc.** 25: 2219-2222
- Runyan, W. R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument** 3rd ed. New York: Mc Graw-Hill.
- Stauber R.E., Parilla P.A., Perins J.D. and Ginley D.S. 2000. Growth and chemical substitution of transparent p-type CuAlO_2 . **Material Research Society Symposium – Proceeding**. 632 : 265-270.
- Tate, J., Jayaraj, M. K., Draeseke, A. D., Ulbrich, T., Sleight, A. W., Vanaja, K. A., Nagarajan, R., Wager J. F. and Hoffman, R. L. 2002. p-type for use in transparent diodes. **Thin Solid Films**. 411: 119-124.
- Tilley, J.D. 2004. **Understanding Solids : The Science of Materials**. Chichester : John Wiley&Son.
- Tsuboi, N., Takahashi, Y., Kobayashi, S., Shimizu, H., Kato, K. and Kaneko, F. 2003. Delafossite CuAlO_2 films prepared by reactive sputtering using Cu and Al targets. **J. Phys. Chem. Solids**. 64: 1671-1674.
- Van der Pauw L.J. 1958. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. **Philips Res. Reports**. 13 : 1-9.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ.2531 การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไคซีไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2545.การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จูตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไคซีไนด์ ($CuInSe_2$). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คูสิต เครื่องงาม.2535. โพลีคริสตัลฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยูเคชั่น.

คูสิต เครื่องงาม.2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรัชย์ ลิภา. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $CdS-ZnS$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสาลละลายเคมี. 2547. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ สุขเกษ. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์.2538. ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้อของฮอลล์ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ $CdTe$. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อุปถัมภ์ นาครักษ์. 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคินูออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมวิธีแผ่นอะออสสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ประธาน ประจวบโชค. 2550. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ชนิด
พี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

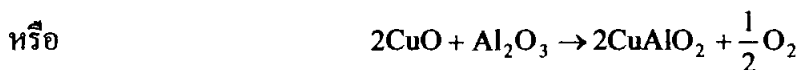
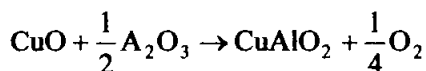
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเพื่อเตรียมเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$)

เราจะใช้ CuO ร่วมกับ Al_2O_3 ให้ได้ CuAlO_2 1 กรัมมีวิธีในการคำนวณดังนี้ จากสมการ



ดังนั้นจะได้ว่า

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

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3 &= 0.5[2(26.9815) + 3(15.994)] \\ &= 0.5(101.9612) \\ &= 50.9806 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

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

ดังนั้นจะได้ CuO หนัก 79.5454 g/mol ร่วมกับ Al_2O_3 หนัก 50.9806 g/mol จะได้ CuAlO_2 หนัก 122.5263 g/mol ดังนั้นถ้าเรา CuAlO_2 1 g/mol จะต้องใช้ CuO และ Al_2O_3 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 Al_2O_3 เท่ากับ 0.4161 g/mol

$\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ ($0 \leq x \leq 0.20$) จะแสดงการคำนวณที่กรณีเจืออะตอมของธาตุ Mg ที่ $x=1$ เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของธาตุ Al จากสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้ว่า

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

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

$$\begin{aligned}0.01\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 0.01[24.312 + 2[14.0067 + 3(15.9994)] + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 2(62.0049) + 108.09204] \\ &= 0.01[24.312 + 124.0098 + 108.09204] \\ &= 0.01(256.41384) \\ &= 2.5641 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{CuAl}_{0.99}\text{Mg}_{0.01}\text{O}_2 &= 63.546 + 0.99(26.9815) + 0.01(24.312) + 2(15.9994) \\ &= 63.546 + 26.711685 + 0.24312 + 31.998 \\ &= 122.499605 \text{ g/mol}\end{aligned}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Pattern : 351401 | | Radiation = 1.540598 | | Quality : Calculated | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------|----------------------|----------|----------|
| CuAlO ₂ | | 2th | I | h | k | l |
| Copper Aluminum Oxide | | 15.678 | 10 | 0 | 0 | 3 |
| | | 31.671 | 40 | 0 | 0 | 6 |
| Lattice : Rhombohedral | | 36.690 | 47 | 1 | 0 | 1 |
| | | 37.851 | 100 | 0 | 1 | 2 |
| S.G. : R-3m (166) | | 42.282 | 23 | 1 | 0 | 4 |
| | | 48.311 | 9 | 0 | 0 | 9 |
| a = 2.85670 | | 52.870 | 4 | 1 | 0 | 7 |
| | | 57.222 | 30 | 0 | 1 | 8 |
| c = 16.94300 | | 65.263 | 26 | 1 | 1 | 0 |
| Z = 3 | | 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 |
| COLOR :Dark blue | | 80.891 | 2 | 0 | 2 | 4 |
| SAMPLE PREPARATION ; Prepared by solid state | | 85.202 | 3 | 1 | 1 | 9 |
| reaction of Cu ₂ O and Al ₂ O ₃ at 1373 K in N ₂ | | 90.229 | 2 | 0 | 1 | 14 |
| atmosphere. | | 92.305 | 3 | 2 | 0 | 8 |
| | | 100.198 | 3 | 1 | 1 | 12 |
| | | 100.900 | 3 | 0 | 2 | 10 |
| | | 104.608 | 2 | 1 | 0 | 16 |
| ANALYSIS :Chemical analysis (wt.%) : Cu 51.8, Al | | 109.837 | 2 | 0 | 0 | 18 |
| 22.1,O 26.1. | | 111.194 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | 111.954 | 4 | 1 | 2 | 2 |
| | | 112.859 | 1 | 0 | 1 | 17 |
| ADDITIONAL PATTERN: To replace 9-185 | | 115.046 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| | | 128.451 | 3 | 1 | 2 | 8 |
| GENERAL COMMENTS : 3R polytype | | 138.182 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| | | 140.439 | 2 | 2 | 1 | 10 |
| | | 146.467 | 1 | 0 | 2 | 16 |
| *Private Communication,(1984) primary reference: | | 147.921 | 1 | 0 | 1 | 20 |
| Ishizawa, N., Tokyuu 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 | 0 |
| S.G. : Fd3m (227) | | Volume[CD] = 527.12 | 36.874 | 100 | 3 | 1 | 1 |
| a = 8.07800 | Z = 8 | I/Icor = 3.20 | 38.557 | <1 | 2 | 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 :CuKa1 | Fitter : Not specified | | | | | | |
| Lambda : 1.54060 | d-sp : Calculated spacings | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Pattern : 80-1917 | | Radiation = 1.540598 | | Quality : Calculated | | |
|--|----------------------------|----------------------|-----|----------------------|---|---|
| CuO | | 2th | I | h | k | l |
| Copper Oxide | | | | | | |
| 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/Icor = 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 :CuKa1 | Fitter : Not specified | | | | | |
| Lambda : 1.54060 | d-sp : Calculated spacings | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 |
| | | | | 61.519 | 27 | 2 |
| | | 65.703 | <1 | 2 | 2 | 1 |
| | | 69.753 | <1 | 3 | 1 | 0 |
| ICSD COLLECTION CODE : 031057 | | 73.699 | 20 | 3 | 1 | 1 |
| REMARKS FROM ICSD : No R value given | | 77.567 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| TEST FROM ICSD : At least one TF missing | | 85.153 | <1 | 3 | 2 | 1 |
| <p>*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary refernce: * Z. Kristallogr., Kristalltallphys., Kristallchem., volume 57 , page Niggli, P.</p> | | | | | | |
| Radiation :CuKa1 | | Fitter : Not specified | | | | |
| Lambda : 1.54060 | | d-sp : Calculated spacings | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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/Icor = 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 :CuKa1 | | Fitter : Not specified | | | | |
| Lambda : 1.54060 | | d-sp : Calculated spacings | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิวพร สวนอยู่ เกิดเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ.2526 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนดอนเมืองทหารอากาศบำรุง และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

นางสาวกัลยา เกื่อนวิสัย เกิดเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน พ.ศ.2528 เป็นคนฉะเชิงเทรา โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนตดครุณี และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

นางสาวลัดดาวรรณ นะเป้า เกิดเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ.2528 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนพรตพิทยพยัต และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547