

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย (Mamazza; et.al, 2005)

โคแคดเมียม สแตนเนต (Cd_2SnO_4) เป็นสารประกอบที่ได้รับการศึกษามากที่สุดในระหว่างสารประกอบออกไซด์เชิงสาม (ternary oxides) และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในการเตรียมฟิล์มบางที่มีการนำไฟฟ้าและส่องผ่านแสงที่สูง Cd_2SnO_4 เริ่มต้นศึกษาโดย Nozik ในปี 1972 หลังจากนั้น Haacke ได้ทำการศึกษาต่อและเป็นส่วนหนึ่งของการเริ่มต้นของการผลิตฟิล์มที่มีการนำไฟฟ้าสูง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเร็วๆนี้ห้องปฏิบัติการ Nation Renewable Energy ที่สหรัฐอเมริกาได้ผลักดันการพัฒนาในเทคโนโลยีและการทำความเข้าใจของสารประกอบ Cd_2SnO_4 ให้เป็นความสำเร็จ ซึ่ง Cd_2SnO_4 ยังไม่เคยมีการนำไปใช้ในขอบเขตที่มากพอทั้งในด้านการค้าหรือในด้านอื่นๆ

Cd_2SnO_4 มีค่าความคล่องตัวของพาหะสูงและขอบการดูดกลืนเลื่อนไปยังความยาวคลื่นที่สั้นลงด้วยการเจือให้เป็นสารประกอบชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์มอส-เบอส์ไตน์ (Moss-Burnstein shift) ยิ่งมีการเจือสารเข้ามาอีกเล็กน้อยก็จะเพิ่มมากขึ้น ผลนี้เป็นการเพิ่มการส่งผ่านแสงในช่วง UV และการสะท้อนแสงในช่วง IR พร้อมด้วยการเพิ่มการนำไฟฟ้า โครงสร้างของผลึกพหุพันธ์ของ Cd_2SnO_4 มาจากโครงสร้างออร์โทโรมบิก (orthorhombic) ของ Sr_2PbO_4 โดย Cd_2SnO_4 ซึ่งมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.06 eV

ทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์ Cd_2SnO_4 จะมีสถานะทางพลังงานที่ต่ำเมื่อมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โทโรมบิก(orthorhombic) อย่างไรก็ตามสันนิษฐานว่าโครงสร้างผลึกแบบสปินเนล (spinel) สามารถเขียนเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้ $(M^{2+})_2M^{4+}(O^{2-})_4$; $M^{2+} = Cd$, $M^{4+} = Sn$ ส่วนแอนไอออน(anions) O^{2-} มีการจัดเรียงตัวแบบ ccp(cubic closed packing) ซึ่งเกิดเป็นหลุมในแบบออกตะระฮีดรอล (octahedral) และเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ในกรณีหลุมแบบออกตะระฮีดรอล ไอออน Sn^{4+} จะเข้าแทนที่ครึ่งหนึ่งของตำแหน่งหลุม (hole) ทั้งหมด ส่วนหลุมที่เหลืออีกครึ่งจะถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} ส่วนหลุมในแบบเตตระฮีดรอลทั้งหมดถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} ในสารประกอบ Cd_2SnO_4 นี้เชื่อว่าการเพิ่มขึ้นของ Cd^{2+} ที่แทรกในโครงผลึก(interstitial) จะทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกที่ชนิดการนำไฟฟ้าแบบอื่น นอกจากนั้นแวนแคนซี (vacancy) ของออกซิเจนยังส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะทำให้สาร Cd_2SnO_4 นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากการคำนวณเชิงทฤษฎี ข้อบกพร่องผลึกทั้งสองอย่างดังกล่าวข้างต้นแม้ว่าจะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ทำให้นำไฟฟ้าได้ดี) แต่ทว่าการเกิดข้อบกพร่องทั้งสองอย่างนี้เกิดได้ยากเนื่องจากพลังงานการก่อเกิด (formation energy) หรือพลังงานไอออไนซ์ (ionization energy) มีค่าสูงมากเกินไป ดังนั้นข้อบกพร่องของผลึกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดชนิดการนำไฟฟ้าแบบอื่นน่าจะมาจากการแทนที่อะตอมแคดเมียมด้วย Sn^{4+} ดังนั้น การแทนที่กันระหว่างแคดเมียม (Cd) กับทิน (Sn) ด้วยกันเอง อาจจะเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดใหม่ที่แตกต่างไปจากสารประกอบออกไซด์เชิงสอง (binary oxide) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปและมีผู้รายงานว่าขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ $\text{Cd}_2\text{SnO}_4/\text{CdS}/\text{CdTe}$ ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 16.5%

โดยในโครงการงานพิเศษนี้ได้สนใจที่จะทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ด้วยวิธีเกิดเป็นสารละลายของแข็งเพื่อต้องการสร้างเป็นชั้นตัวนำโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์และศึกษาถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid state reaction)
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวเชิงมหภาคของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและนำสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนทางรังสีเอ็กซ์ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและรวบรวมข้อมูลจากผลงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์
- 1.4.2 ศึกษาการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.4.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ในย่านความยาวคลื่น $Cu_{K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)
- 1.4.6 วิเคราะห์ผลและสรุปผล
- 1.4.7 เขียนรูปเล่มโครงการพิเศษ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง
- 1.5.2 ได้สารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) เมื่อนำไปใช้เป็นชั้นตัวนำโปร่งแสงในเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.5.3 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางด้านฟิสิกส์พื้นฐานหลายประการของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมเซรามิกส์ของตัวนำโปร่งแสง Cd_2SnO_4



นางสาวเกวลี มุฑตา
นางสาวปภัศร วัดโส
นางสาวศิวพร ภู่ออด

รศ.
กช.ก
2550

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... **81601**
วัน,เดือน,ปี 19 ต.ย. 2551

b. 110 3A6A5
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Transparent Conducting Cd_2SnO_4 Ceramics



Miss. Kewalee Muthuta
Miss. Paputsorn Watso
Miss. Siwaporn Purod

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the 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 การเตรียมเซรามิกส์ของตัวนำโปร่งแสง Cd_2SnO_4
นักศึกษา นางสาวเกวลี มุฑตา
 นางสาวปภัศศร วัตโส
 นางสาวศิวพร ภู่ออด
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภู่วัฒนเกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ อ.ฉัฐพร พรหมรส	
กรรมการ อ.ภารุจ บัณฑิตาคาวิทย์	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
กรรมการที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภู่วัฒนเกียรติ	

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เดชศิธีระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมเซรามิกส์ของตัวนำโปร่งแสง Cd_2SnO_4
นักศึกษา	นางสาวเกวตี มุฑตา นางสาวปภัศร วัดโส นางสาวศิวพร ภู่ออด
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรัศมิ์เกียรติ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdO , SnO และ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเริ่มต้นจากการบดสารตั้งต้นให้ละเอียดและคลุกเคล้ากันดี จากนั้นจึงนำมาขึ้นรูปโดยการอัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องไฮดรอลิกความดันสูงที่อุณหภูมิห้อง ผลึกที่อัดเป็นเม็ดแล้วจะเอาไปเผาในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ส่วนภาพถ่ายของผิวหนังผลึกของสารตัวอย่างได้จากการบันทึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของและปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นสามารถคำนวณได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ จากค่าพลังงานกระตุ้นเหล่านี้สามารถระบุได้ว่าชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็นของเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ขึ้นกับข้อบกพร่องผลึก

Special Project Title	Preparation of Transparent Conducting Cd_2SnO_4 Ceramics	
Name	Miss. Kewalee	Muthuta
	Miss. Paputsorn	Watso
	Miss. Siwaporn	Purod
Department	Applied Physics Faculty of Science	
Program	Applied Physics	
Academic Year	2007	
Special Project Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen	
Special Project Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat	

ABSTRACT

In this special project , ceramics of $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) was prepared by a solid state reaction method. The mixture of high purity of CdO , SnO and $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ powders was ground and then pressed by using uniaxial pressure. The obtained pellets were sintered in air at 1050°C for 48 h. Ceramis of $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ was checked by X-ray diffraction method. Surface morphology of samples was observed by scanning electron microscope(SEM). Electrical resistivity and Hall effect were performed on the ceramics of $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$. The activation energy value of samples were estimated by the resistance measurements as a function of temperature. From the activation energy values, the origin n-type conduction in ceramics of $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ is related to crystalline defects.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ และ อาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิตินัย เรื่อง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจวบใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตร มิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_K\alpha$ เท่ากับ 1.5406 \AA ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของสารประกอบเซรามิกส์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรวงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์ ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และชุดวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์ และเครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณ คุณจุฑามาส วัฒนานุกัณฑ์ คุณประธาน ประจวบโชค คุณณัฐวัฒน์ ทุมเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวเกวลิ มุฑตา

นางสาวปภัศร วัดโส

นางสาวศิวพร ภู่ออด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

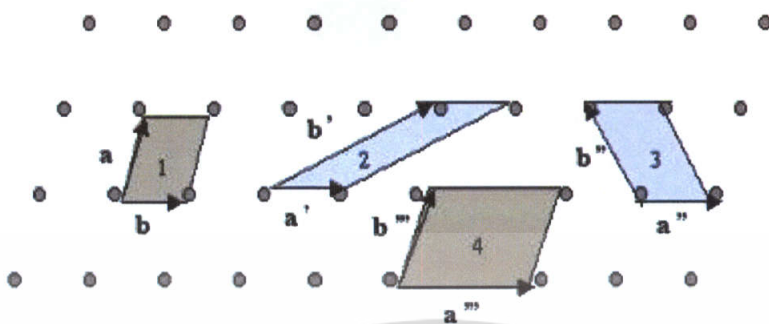
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีโครงสร้างผลึก

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Mamazza, 2005; งามนิษฐ์ และคณะ, 2545; จูตินัย, 2530; งามนิษฐ์, 2531; วีรัชย์, 2547)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

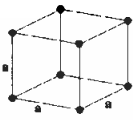
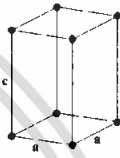


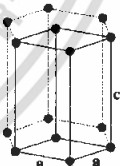
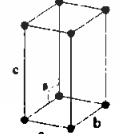
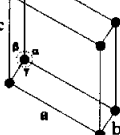
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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 \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และเฮกซะโกนอล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก(Mamazza, 2005; งามนิิตย์และคณะ, 2545; จูตินัย, 2530; งามนิิตย์, 2531; วีรัชชัย, 2547)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

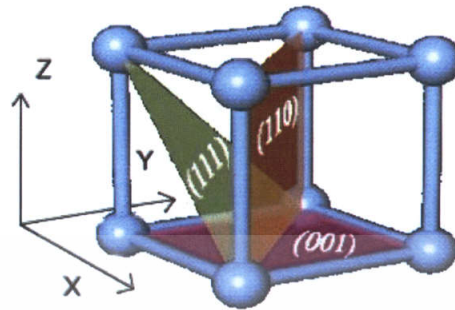
การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นแต่ละค่า ตัวอย่างจุด(1,2,3) หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u\ v\ w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2}\ 1]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุระนาบจะใช้อักษร (h k l) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ข้างบนตัวเลขดัชนี มิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนี มิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้นอาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศ

ทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนี มิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
 2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
 3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนี มิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ
- ดังแสดงในรูปที่ (2.3) และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

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

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

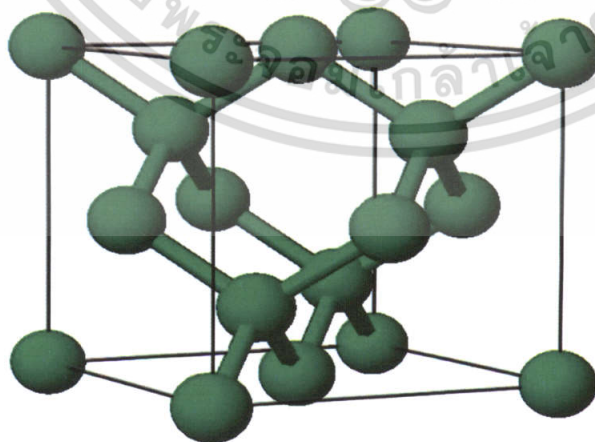
- เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเอเหมือนๆ กันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆ

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

2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) (Mamazza, 2005; งามนิศย์และคณะ, 2545; ฐิตินัย, 2530; งามนิศย์, 2531)

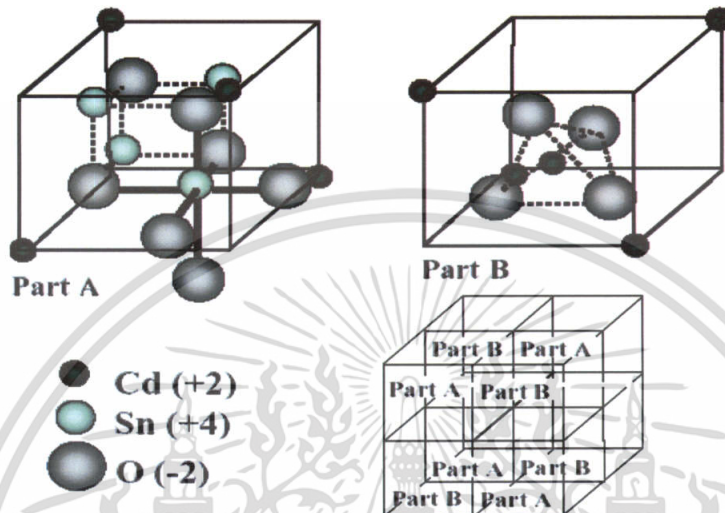
โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ α -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างแบบเพชรนี้เกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของเส้นทแยงมุม หนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอิเล็กทรอนิกส์เท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่ง (000) , $(0\frac{1}{2}\frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}0\frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}0)$, $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4})$ ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดคูมบ์ (coloumb) ซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทาง นอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ (covalent) ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิก (cubic) ซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกสปินเนล (inverse spinel)



รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกสปินเนล

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกสปินเนล (spinel) สามารถเขียนเป็นสูตรทั่วๆไปได้ดังนี้; $M^{2+} = Cd$, $M^{4+} = Sn$ ส่วนแอนไอออน (anions) O^{2-} มีการจัดเรียงตัวแบบ ccp (cubic closed packing) ซึ่งเกิดเป็นหลุมในแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) และเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ในกรณีหลุมแบบออกตะฮีดรอล ไอออน Sn^{4+} จะเข้าแทนที่ครึ่งหนึ่งของตำแหน่งหลุม (hole) ทั้งหมด ส่วนหลุมที่เหลืออีกครั้งจะถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} ส่วนหลุมในแบบเตตระฮีดรอลทั้งหมดถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) ของ Cd_2SnO_4 ประกอบไปด้วยอะตอม Cd จำนวน 16 อะตอม อะตอม Sn จำนวน 8 อะตอม และอะตอมออกซิเจนจำนวน 32 อะตอมรวมทั้งหมดเป็น 56 อะตอม ดังนั้นอะตอม Cd จำนวน 8 อะตอม จะอยู่ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล (tetrahedral site) ส่วนอะตอม Cd อีก 8 อะตอม จะอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล (octahedral site) ในขณะที่อะตอม Sn จำนวน 8 อะตอม จะอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล ซึ่งตำแหน่งออกตะฮีดรอลภายในโครงสร้างผลึกนี้จะถูกครอบครองโดยอะตอม Cd และ Sn เป็นแบบสุ่ม (random)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก (Mamazza, 2005; Cullity, 1956; Marquardt .et.al, 2006; Dieter, 1998; Hearle J; et.al. 1973; Runyan W. R, 1975; สมฤทธิ์, 2538, Elangovan E; 2003. งามนิตย์และคณะ 2545, จูตินัย; 2530, งามนิตย์; 2531, วีรัชย์; 2547, อุปถัมภ์; 2548, สุกฤษฎี; 2547)

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

2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

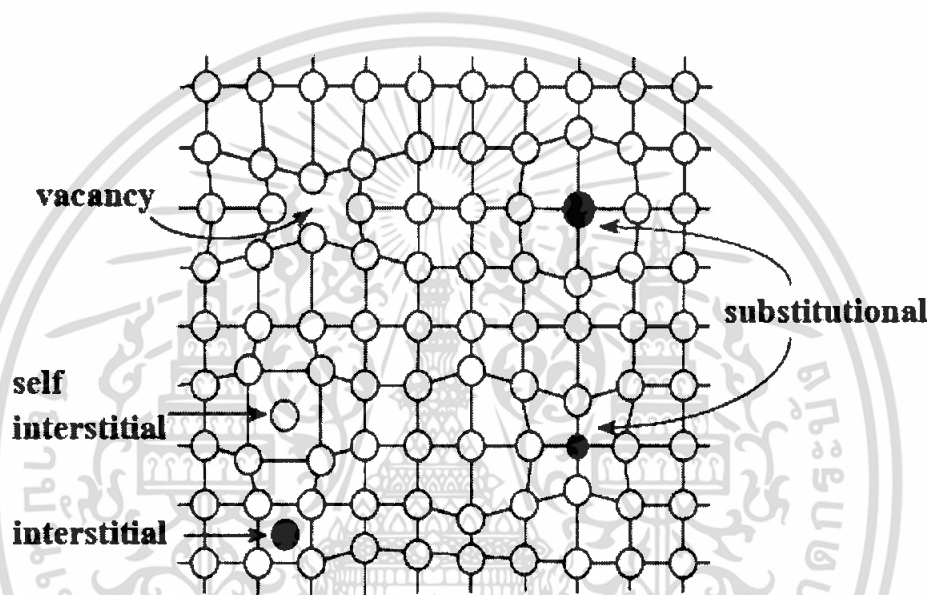
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.8 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

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

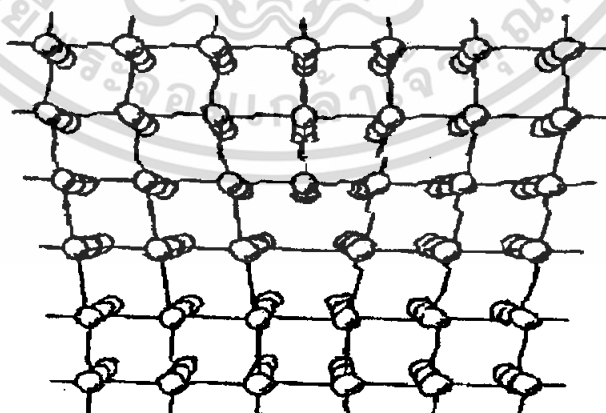
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุด โครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) ดังรูปที่ 2.6 และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7

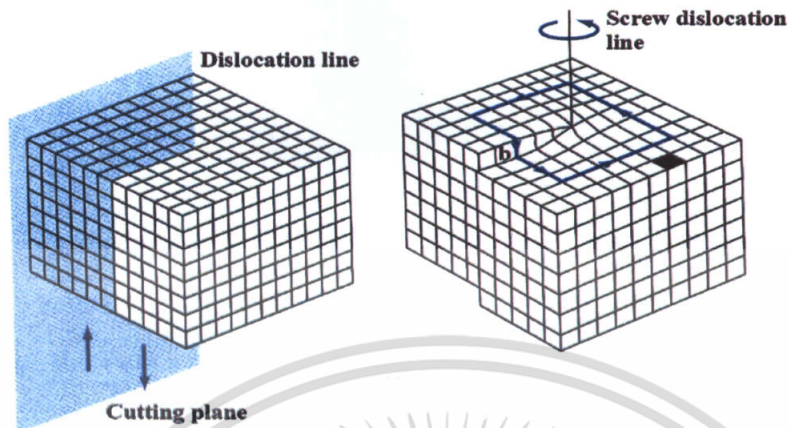


รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ

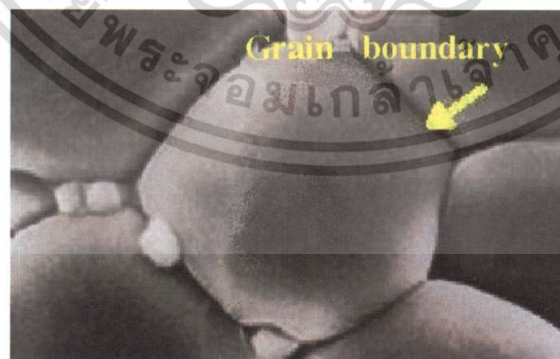
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

2.1.4.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), ตลอดจนเกรน และขอบของเกรน ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (Mamazza, 2005; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2530; วีรัชย์, 2547)

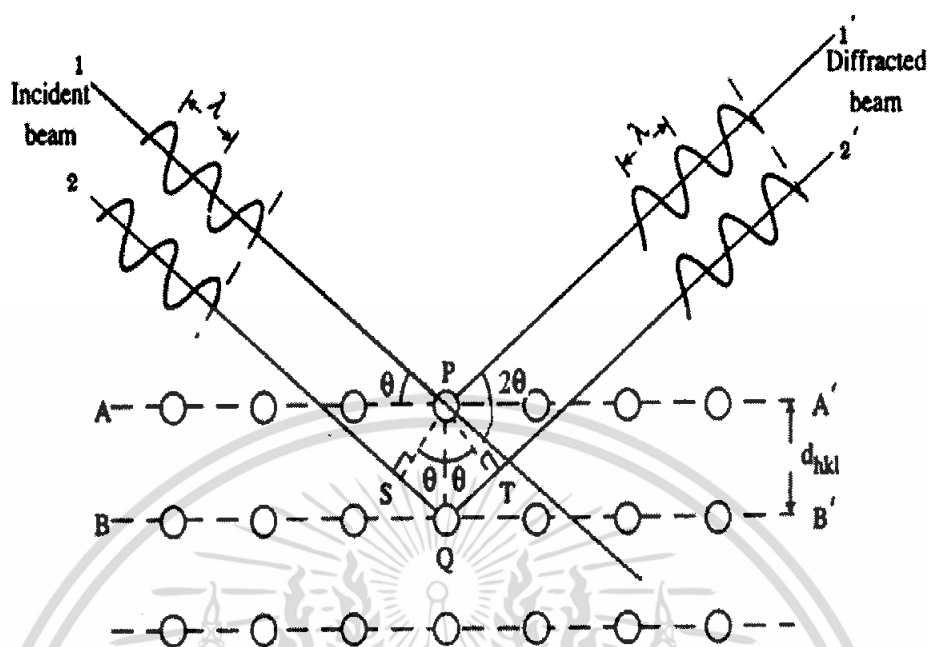
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์

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

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

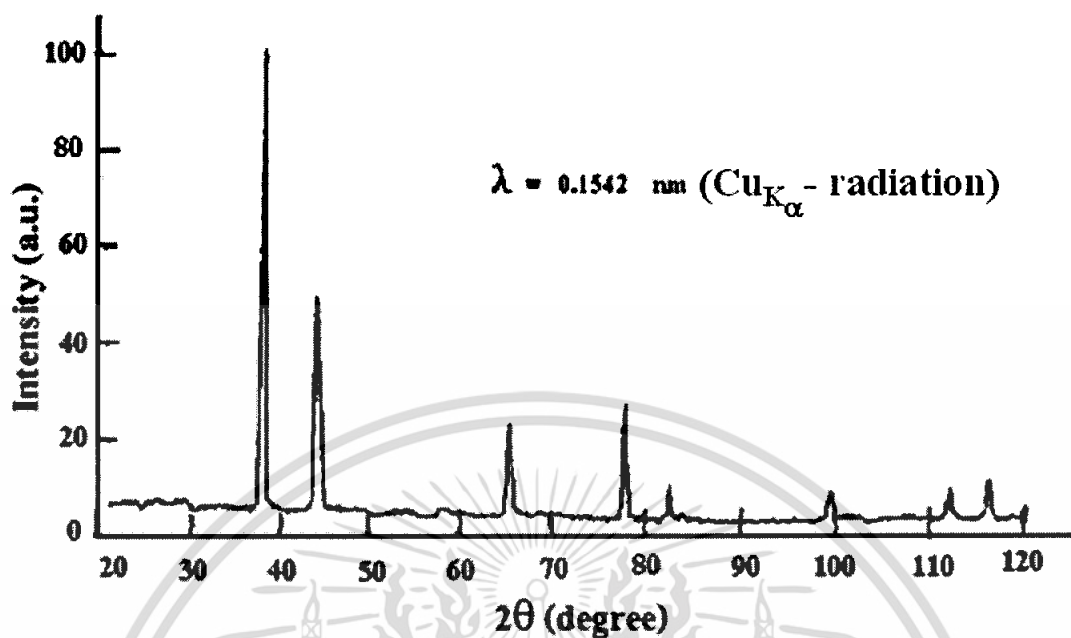
เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
	θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบร์รอก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ	ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
	λ	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบร์รอก์ เรียกว่าระนาบแบร์รอก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร์รอก์

รูปที่ 2.10 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

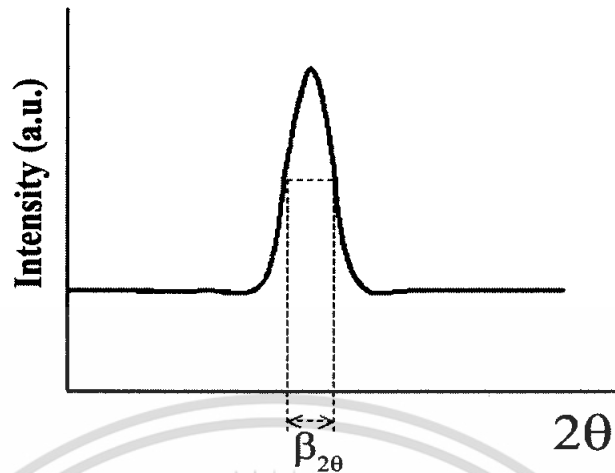
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ(2.3)

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

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 ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบ



รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

พิจารณารูปที่ 2.11 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 K คือ ค่าคงตัวซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ต่ำเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

81601

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (อุปถัมภ์, 2548; สุกฤษฎี, 2547)

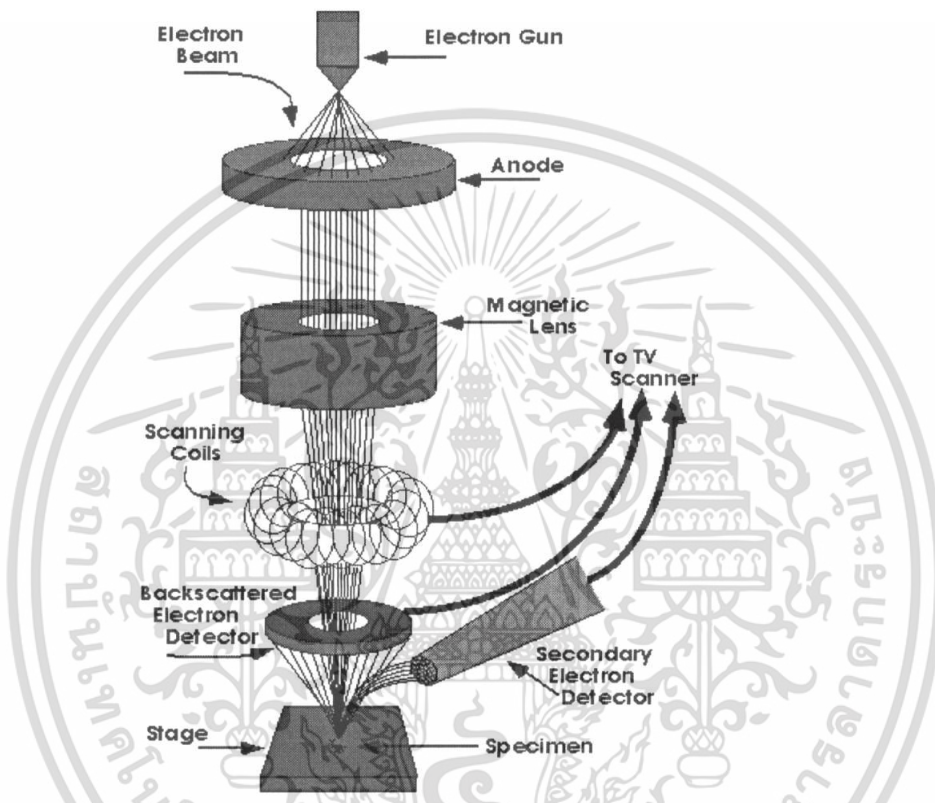
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้นและต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก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

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Tilley J.D., 2004)

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 2.12 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ โดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (Mamazza, 2005; Cullity, 1956; Marquardt, 2006; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2530)

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 ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำ

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

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

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) $= 6.625 \times 10^{-34}$ 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) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)d(E)$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.9) จึงสามารถขยายขอบเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.9) ใหม่ได้เป็น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

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

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

จากสมการที่ (2.17) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

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

$$n = N_C \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.19)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_V \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.20)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานซ้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

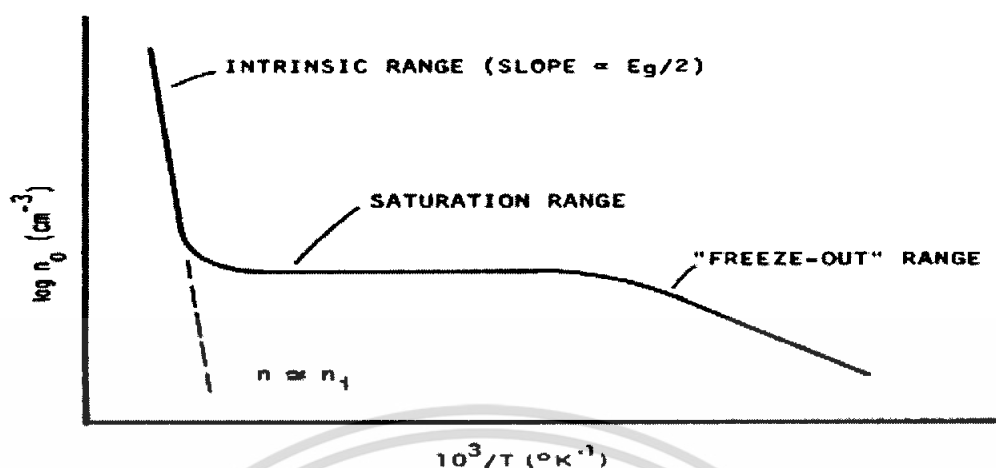
$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.21)$$

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

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

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

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือ



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ ส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้จะต่อมของสิ่งเจือปนจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พหุอะตอมเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.22) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.24)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.25)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนหลายๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.24) และ (2.26) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรีนสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มากจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.25) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.27)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.27) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.28)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.29)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.19), (2.28) และ (2.29) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.30) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.30)$$

$$\text{เมื่อ} \quad N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.31)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N'_c จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.32) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (Binomial series) จะได้

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

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.33)$$

ถ้า $N_a \gg N'_c$ สมการที่ (2.33) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N'_c \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.34)$$

ถ้า N_a มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N'_c \gg N_a$ จะทำให้สมการที่ (2.34) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_c = 0 \quad (2.35)$$

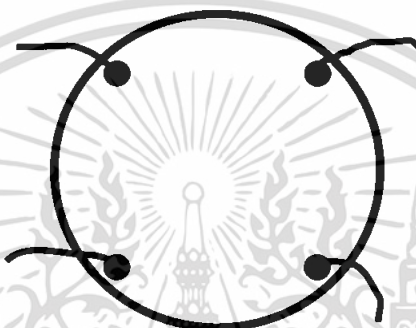
หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.36)$$

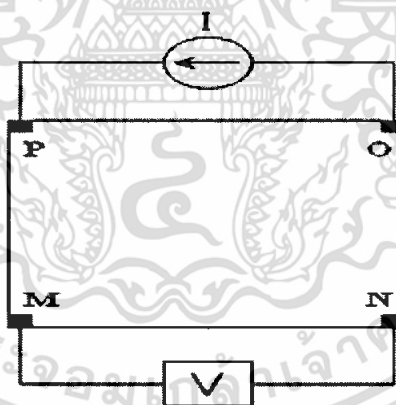
จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่านฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.35) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.36) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Runyan, 1975; Cullity, 1956; Hearle, 1973; Marquardt, 2006; สมฤทธิ์, 2538)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.37)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.38)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.38)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.39)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์พาว์ (van der Pauw correction factor)

$$\text{โดย } f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.40)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.41)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

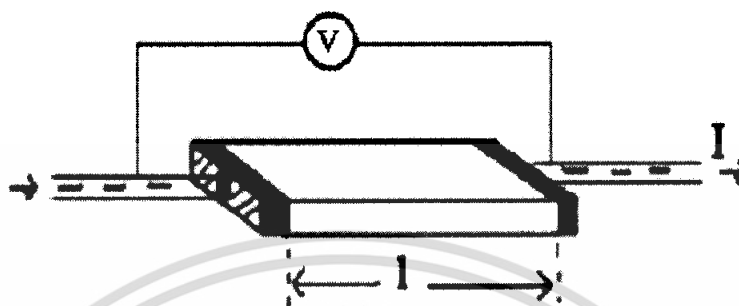
2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

(Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Cullity, 1956; Marquardt, 2006; Hearle, 1973; สมฤทธิ์, 2538)

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

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปลอกกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้ว ศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.42)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.43)$$

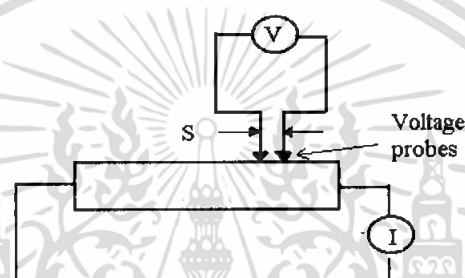
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

(Cullity, 1956; Marquardt, 2006; Hearle, 1973; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; สมฤทธิ์, 2538)

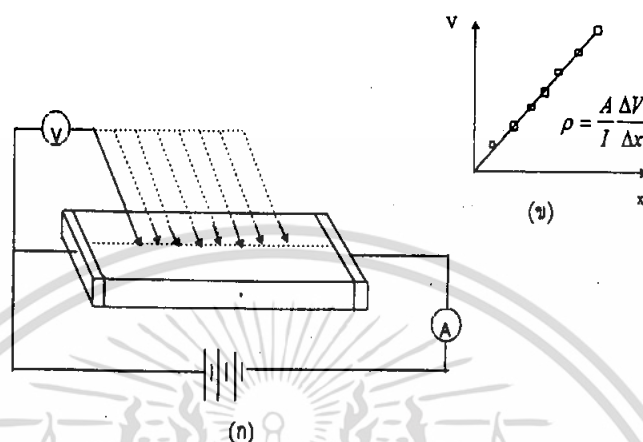
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.17 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเชื่อมเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเชื่อมเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนั้นจะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.18 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.2.5 ปรากฎการณ์ฮอลล์ (Marquard, 2006; Dieter, 1998; Kittle, 1971; งามนิศย์, 2545)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.44)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.45)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.46)$$

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

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.44) และ (2.45) คือ

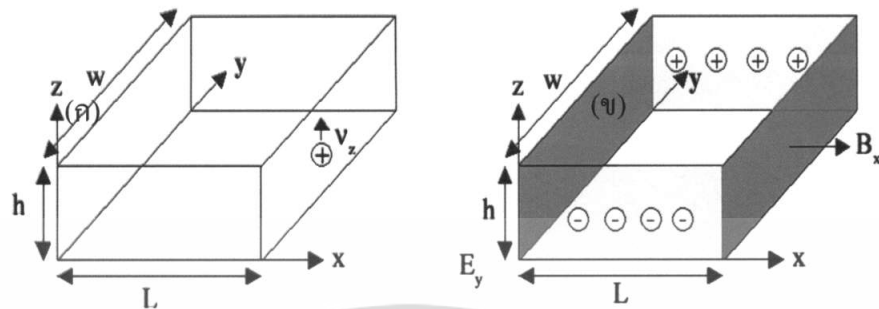
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $n = \frac{1}{e\rho\mu_e}$ (2.47)

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล $p = \frac{1}{e\rho\mu_p}$ (2.48)

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



รูปที่ 2.19 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศ x

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว z หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ z ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_z เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง z คือ I_z ดังสมการที่ (2.49)

จาก
$$I = nqvA \quad (2.49)$$

ดังนั้น
$$I_z = qnwhv_z \quad (2.50)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.51)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.52)$$

จากรูปที่ 2.20
$$A = w.h \quad (2.53)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_z) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.51) (2.52) และ (2.53)

$$\rho = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_z}{I_z} \cdot \frac{wh}{L} \quad (2.54)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_x) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ x เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าอย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในไม่ช้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศ 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)

$$F = q(v_z \times B_x) + qE_y \quad (2.55)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_z B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z}{wh} \cdot B_x \quad (2.56)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.56) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_z B_x \quad (2.57)$$

เมื่อ

$$J_z = \frac{I_z}{wh} \quad (2.58)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_z B_x} = \frac{1}{qn} \quad (2.59)$$

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_z B_x}{wh} dy \\ &= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_x}{h} \end{aligned} \quad (2.60)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \quad (2.61)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_z}{V_H} \cdot \frac{B_x}{qh} \quad (2.62)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เกิดขึ้นที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลาย ๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.63)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น $R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.64)$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี $R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.65)$

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

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.66)$$

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

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 G ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.43) และ (2.57) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.68)$$

หรือ จากสมการที่ (2.68)
$$\mu_H = \frac{V_H}{I_z} \cdot \frac{h}{B_x} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.69)$$

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

2.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Hearle, 1973; Runyan, 1975; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2530; อุปลัมภ์, 2548; สุกฤษฎี, 2547)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปีง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใด ๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร

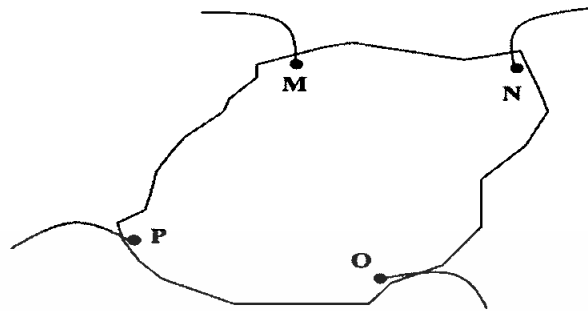
ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M N O และ P กระจายอยู่ที่

บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.70)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

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

d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

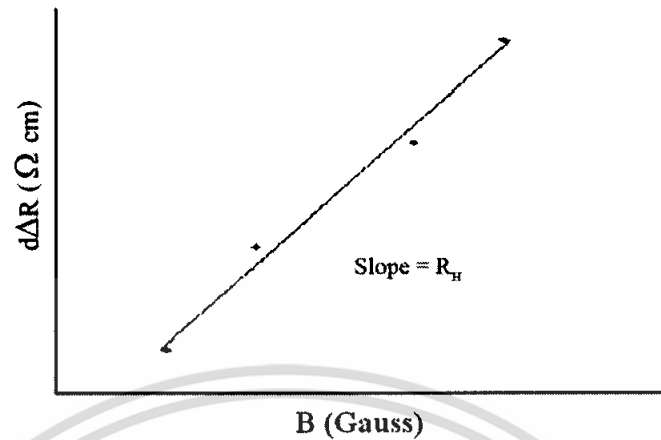
B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.71) จะได้ว่า

$$d \cdot \Delta R_{MNOP} = R_H B \quad (2.72)$$

เมื่อทำการวาดกราฟระหว่าง $d \cdot \Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.21 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d\Delta R_{MNOF}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \Delta R_{MNOF} \quad (2.73)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.74)$$

เมื่อ h คือค่าคงตัวของพลังค์

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.3 การเกิดปฏิกิริยาสารละลายของแข็ง (Solid solution) (งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2530)

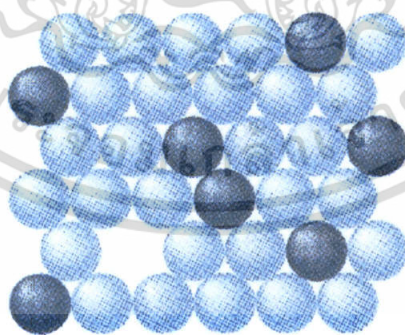
มีอยู่สองรูปแบบคือสารละลายของแข็งแบบซัปสตีติวชันนัล (substitutional solid solution) และสารละลายของแข็งแบบอินเตอร์สตีเชียล (interstitial solid solution) เมื่ออะตอมของธาตุ 2 ชนิดหรือมากกว่ารวมตัวกันกลายเป็นของผสมที่มีเนื้อเดียวกัน และเกิดในสภาวะของแข็ง เรียกว่าสารละลายของแข็งธาตุที่มีอะตอมอยู่มากเรียกว่าตัวทำละลาย (solvent) และธาตุที่มีอะตอมน้อยกว่าเรียกว่า ตัวถูกละลาย (solute)

สารละลายของแข็งเกิดได้ 2 ลักษณะ

คือ สารละลายของแข็งแบบซัปสตีติวชันนัล

อะตอมตัวถูกละลายจะแทนที่อะตอมตัวทำละลายโดยตรง ดังภาพ แสดงอะตอมของธาตุ 2 ชนิด (Cu และ Ni) โดยอะตอมทองแดงจะเข้าไปแทนที่อะตอมของนิกเกิลโดยปริมาณของอะตอมที่สามารถเข้าไปแทนที่อะตอมหลัก ขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของอะตอมหรือไอออน (size factor)
- ค่าเวเลนซ์ (valency factor) เท่ากัน
- ความสามารถในการทำปฏิกิริยา (chemical affinity)
- ชนิดโครงสร้างผลึก (structure type) ของธาตุทั้งสองจะต้องเหมือนกัน

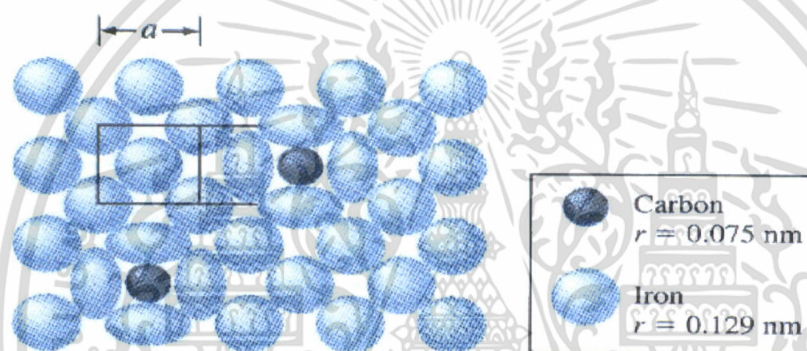


ภาพที่ 2.22 แสดงสารละลายของแข็งแบบซัปสตีติวชันนัล

เมื่อปริมาณของอะตอมที่เติมลงในอะตอมหลักมีมากขึ้น อาจทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งอาจจะมีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (disordered solid solution) หรือแบบเป็นระเบียบ (ordered solid solution) ขึ้นอยู่กับกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) และอุณหภูมิ สารละลายของแข็งแบบอินเตอร์สตีเชียล (interstitial solid solution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจาก อะตอมจะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างหลักของอะตอมหลัก โดยตำแหน่งดังกล่าว จะเป็นช่องว่างที่เรียกว่าตำแหน่งอินเทอร์สติเชียล (interstitial sites) โดยโครงสร้างผลึกหรือแลตทิซแต่ละชนิดจะมีจำนวนและชนิดของตำแหน่งของอินเทอร์สติเชียล ไม่เหมือนกัน สำหรับชนิดของ ตำแหน่งอินเทอร์สติเชียลที่พบได้มีอยู่สองชนิดคือ ตำแหน่งเตตระฮีดรอล (tetrahedral sites) และตำแหน่ง ออกตะฮีดรอล (octahedral sites) ตัวอย่างอะตอมตัวถูกละลายจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างระหว่างอะตอมตัวทำละลาย ดังภาพ อะตอมของคาร์บอนแทรกตัวระหว่างอะตอมเหล็ก



ภาพที่ 2.23 แสดงสารละลายของแข็งแบบอินเทอร์สติเชียล

ธาตุต่าง ๆ ที่รวมกันแล้วกลายเป็นสารละลายของแข็งจะมีสัดส่วนที่จำกัด มีบางระบบเท่านั้นที่สามารถเป็นสารละลายของแข็งได้ทุกอัตราส่วนของธาตุที่นำมาผสมกัน เช่น Cu-Ni ปกติแล้วธาตุ Ni จะเข้าไปผสมในสารละลายของแข็งได้เพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้น ทำให้เกิดสารละลายของแข็งครั้งแรก (primary solid solution) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเหมือนกับโลหะที่เป็นตัวทำละลาย ถ้าหากธาตุ Ni รวมตัวกับ Cu ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น จะเกิดเฟสใหม่ขึ้นมาและมีโครงสร้างแตกต่างจากเดิม เรียกว่าสารละลายของแข็งครั้งที่สอง (secondary solid solution) ซึ่งถ้าเกิดขึ้นมาก สารละลายของแข็งจะมีเนื้อไม่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง และศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของสารประกอบเซรามิกส์ Cd_2SnO_4 ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก (Gaewdang T.et.al; 1993, Moore D. M; 1989, Banejee A. N.et.al; 2004, Manificier J.C.et.al; 1976, Zribi M.et.al; 2005)

3.1.1 สารตั้งต้นและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)

สารตั้งต้น ประกอบด้วย

- แคดเมียมออกไซด์ (CdO)
- ทินออกไซด์ (SnO)
- บิสมัทไนเตรท($Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$)

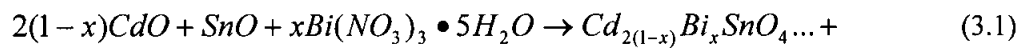
อุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย

- ครกอาเกต
- ชุดเครื่องมืออัดเม็ด
- เครื่องอัดเม็ดสาร
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
- เตาเผาสาร
- ครุชชีเบล

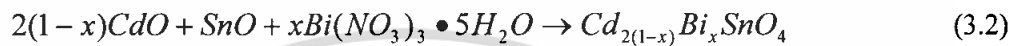
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)
ใช้สารตั้งต้น CdO ร่วมกับ Sn และ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ เพื่อให้ได้ Cd_2BiSnO_4 0.7
กรัม โดยมีวิธีในการคำนวณดังนี้

จากสมการ



หรือ



ดังนั้นมวลโมเลกุลของสารตั้งต้นเป็นดังนี้คือ

เลขมวล	Cd = 112.411	กรัมต่อโมล
	O = 15.9994	กรัมต่อโมล
	Sn = 118.710	กรัมต่อโมล
	Bi = 208.98037	กรัมต่อโมล
	N = 14.00674	กรัมต่อโมล
	H = 1.00797	กรัมต่อโมล

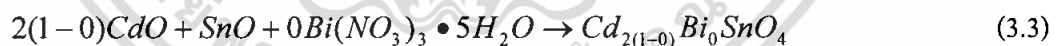
ดังนั้น

$$CdO = 128.4104$$

$$SnO = 134.7094$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = 485.07189$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ไม่มีการเจือ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ จะได้สมการดังต่อไปนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารที่ต้องการเตรียม $2CdO + SnO + 0$

$$2CdO + SnO + 0 = 2(128.4104) + 134.7094 + 0$$

$$= 391.5302 \text{ gmol}$$

แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการต่อไปนี้

ปริมาณสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบ =

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นใน 1 โมล x น้ำหนักของสารทั้งหมดที่มีปริมาณสุทธิ 0.7 กรัม

มวลของสารประกอบเซรามิกส์ใน 1 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

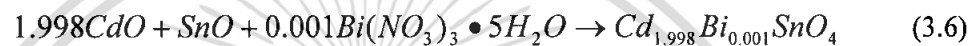
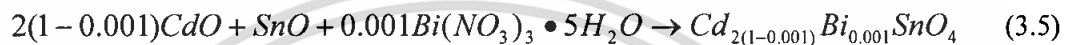
ดังนั้น จะต้องใช้

$$CdO = \frac{256.8208 \times 0.7}{391.5302} = 0.4591 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{391.5302} = 0.2408 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = 0$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x = 0.001$) จะได้สมการดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$= 1.998(128.4104) + 134.7094 + 0.001(485.07189)$$

$$= 391.7583 \text{ g/mol}$$

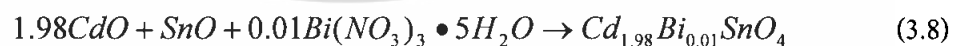
ดังนั้นจะต้องใช้

$$CdO = \frac{256.5639 \times 0.7}{391.7583} = 0.4584 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{391.7583} = 0.2407 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = \frac{0.4850 \times 0.7}{391.7583} = 0.00086 \text{ g}$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ เจือ ($x = 0.010$) จะได้สมการดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$= 1.98(128.4104) + 134.7094 + 0.01(485.07189)$$

$$= 393.8126 \text{ g/mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

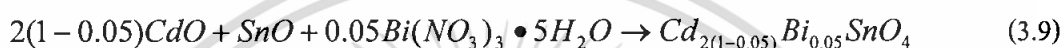
ดังนั้นจะต้องใช้

$$CdO = \frac{256.2525 \times 0.7}{393.8126} = 0.4519 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{393.8126} = 0.2394 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = \frac{4.8507 \times 0.7}{393.8126} = 0.0086 \text{ g}$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x = 0.050$) จะได้สมการดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$\begin{aligned} &= 1.9(128.4104) + 134.7094 + 0.05(485.07189) \\ &= 402.9426 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

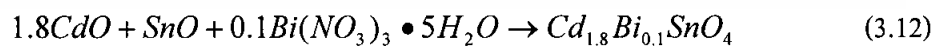
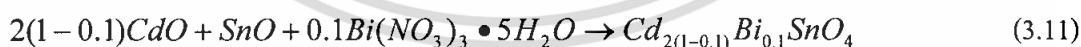
ดังนั้นจะต้องใช้

$$CdO = \frac{243.9797 \times 0.7}{402.9426} = 0.4238 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{402.9426} = 0.2340 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = \frac{24.2535 \times 0.7}{402.9426} = 0.0421 \text{ g}$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x = 0.100$) จะได้สมการดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$\begin{aligned} &= 1.8(128.4104) + 134.7094 + 0.1(485.07189) \\ &= 414.6035 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

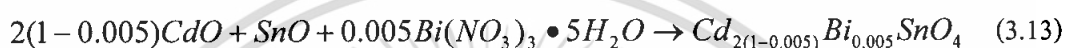
ดังนั้นจะต้องใช้

$$CdO = \frac{231.1387 \times 0.7}{414.6035} = 0.3902 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{414.6035} = 0.2274 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = \frac{48.5071 \times 0.7}{414.6025} = 0.0818 \text{ g}$$

ในกรณี $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x = 0.005$) จะได้สมการดังนี้



น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$= 1.99(128.4104) + 134.7094 + 0.005(485.07189)$$

$$= 392.6713 \text{ g/mol}$$

ดังนั้นจะต้องใช้

$$CdO = \frac{255.5366 \times 0.7}{392.6713} = 0.4555 \text{ g}$$

$$SnO = \frac{134.7094 \times 0.7}{392.6713} = 0.2401 \text{ g}$$

$$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O = \frac{2.4253 \times 0.7}{392.6713} = 0.0043 \text{ g}$$

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ Cd_xSnO_4 ($0 \leq x \leq 0.1$) ได้แสดงไว้ในตาราง 3.1

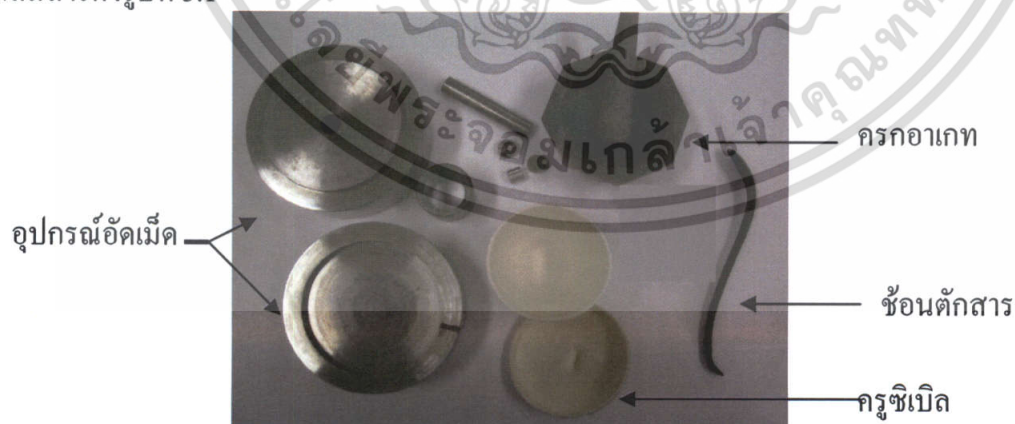
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)

Composition (x) of Bi	CdO (g/mol)	SnO (g/mol)	$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (g/mol)	$Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ (g/mol)
0.000	0.4591	0.2408	-	391.5302
0.001	0.4584	0.2407	0.00086	391.7583
0.005	0.4555	0.2401	0.0043	392.6713
0.010	0.4519	0.2394	0.0086	393.8126
0.050	0.4238	0.2340	0.042	402.9426
0.100	0.3902	0.2274	0.0818	414.6035

3.1.3 การผสมสาร

เริ่มต้น โดยการทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาดแล้วนำครกอาเกตมาวางลงบนกระดาษขาวที่สะอาด นำผงผลึก CdO และ SnO และ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ ที่ซึ่งตามปริมาณที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 3.1 เทผสมรวมกันในครกอาเกตแล้วบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้สารละเอียดเป็นผง แล้วนำสารที่ทำการบดใส่ไว้ในภาชนะเก็บสารที่ได้เตรียมไว้ หลังจากนั้นทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาดแล้วเป่าให้แห้ง โดยได้แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการผสมสารดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

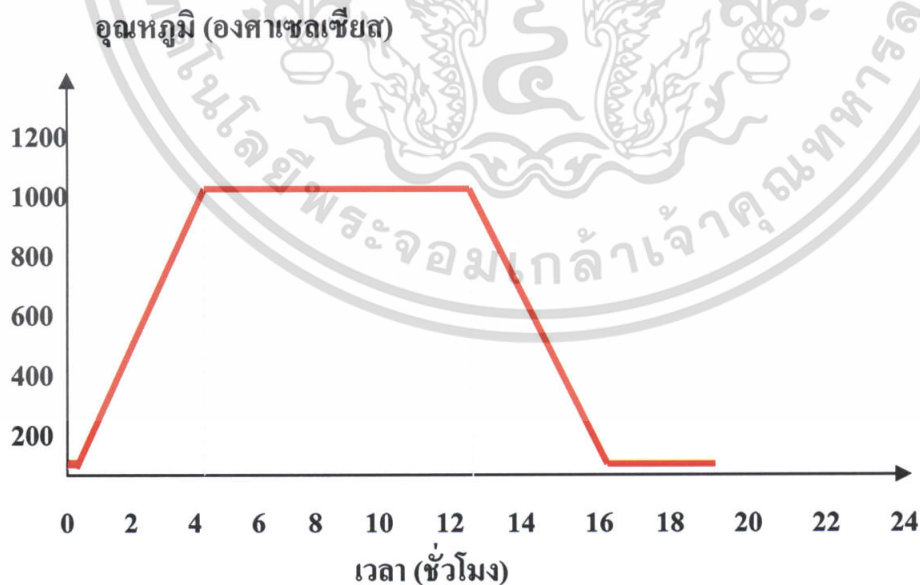
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 การอัดเม็ดสาร

ในการอัดเม็ดสารเริ่มต้นจากการทำความสะอาดเครื่องอัดเม็ดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วนำสารที่ผ่านการบดแล้วไปใส่ไว้ในเครื่องอัดเม็ดแล้วปิดให้เรียบร้อย นำไปวางบนเครื่องอัดไฮโดรลิกแล้วค่อย ๆ อัดให้แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง 0.249 MPa ทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยุดการให้แรงดัน นำสารเทออกมาก็จะได้สารที่มีลักษณะเป็นเม็ด จากนั้นใช้คีมคีบสารเก็บใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วทำความสะอาดเครื่องอัดเม็ดให้เรียบร้อย

3.1.5 ขั้นตอนการเผาสาร

นำสารที่อัดเม็ดแล้วไปใส่ครุชชีเบิ้ลเพื่อที่จะนำไปเข้าเตาเผา (ครุชชีเบิ้ลที่ทนความร้อนได้สูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส) ก่อนใส่สารที่อัดเม็ดแล้วเข้าไปในเตาเผาต้องโรยผงซิลิกาชั้นระหว่างแต่ละเม็ดเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารที่ใส่ในครุชชีเบิ้ล จากนั้นนำเข้าเตาเผา แล้วตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิโดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เมื่อถึงที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้น ให้ลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิห้องแล้วปิดเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร



รูป

ที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

สามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ของ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ได้ดังนี้

ผง CdO + ผง SnO + ผง $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ = 0.7 กรัม

อัดเป็นเม็ดด้วยแรง 0.249 MPa

เผาในเตาเผาอัตรา 100 ต่อ ชั่วโมง จนถึง
1050 องศาเซลเซียส

ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง

ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อ
ชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้อง

สารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)

(Gaewdang T.et.al; 1993, Moore D. M; 1989, Banejee A. N.et.al; 2004, Manificier J.C.et.al; 1976, Zribi M.et.al; 2005)

ในโครงการพิเศษนี้ได้นำสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์หลายประการ ดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ได้ทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ 1.5418 อังสตรอม

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

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

3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ได้ใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

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

3.2.4 การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ได้ใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

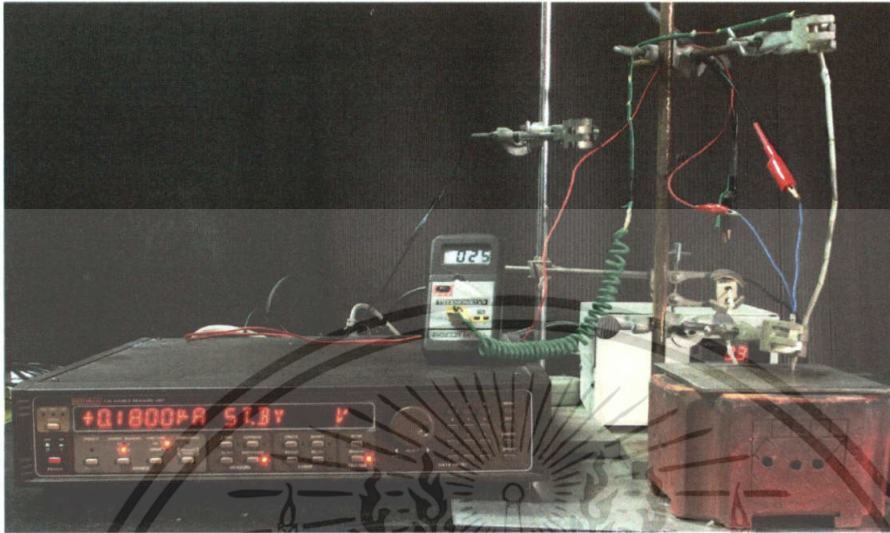
3.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ได้ใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

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

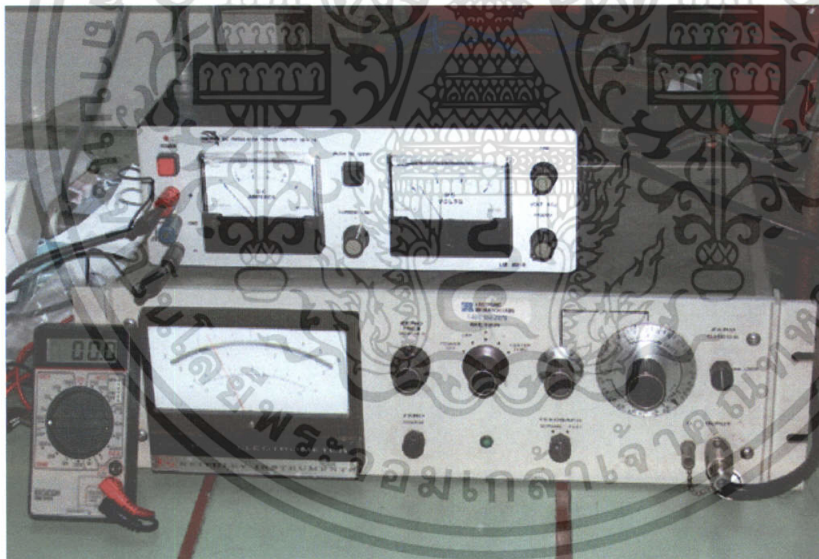


รูปที่ 3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

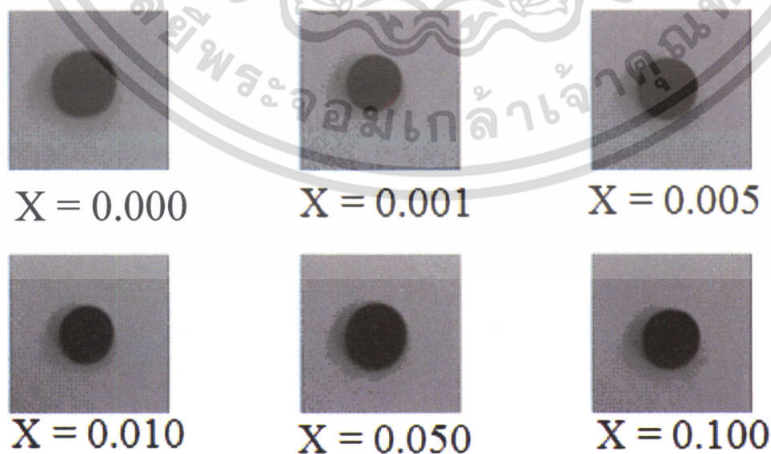
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ในรูปของเซรามิกส์ และได้มีการปรับปรุงสมบัติต่างๆของสารประกอบโดยมีการเจืออะตอมของ Bi เข้าไปโดยจุดประสงค์หลักแล้วคือต้องการเพิ่มค่าสภาพการนำไฟฟ้าและเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะข้างมากซึ่งคือโฮลนั่นเอง

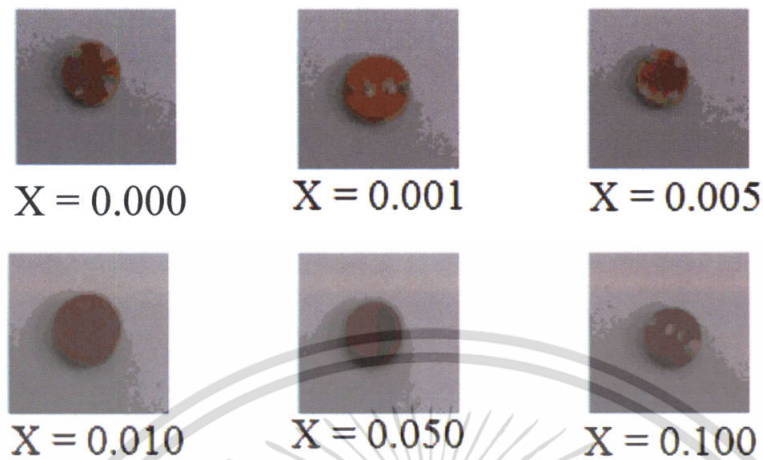
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

4.1.1 สารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

สารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งขณะยังไม่มีการเผาจะเป็นสีน้ำตาลปนดำแต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $1050^\circ C$ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองในช่วง $0 \leq x \leq 0.001$ และจะมีสีน้ำตาลปนเหลืองในช่วง $0.50 \leq x \leq 0.10$



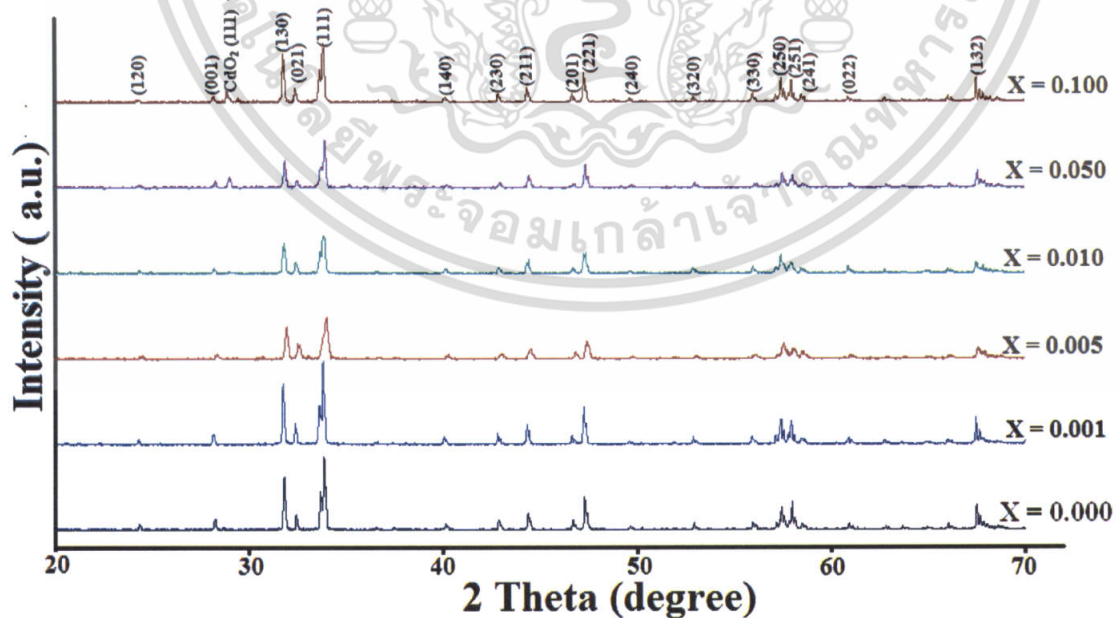
รูปที่ 4.1 แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสาร CdO , SnO และ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ ที่บดรวมกัน และนำไปอัดเป็นผงผลึก $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารถึงตัวนำว่าเป็นชนิดใดและมีโครงสร้างแบบใด

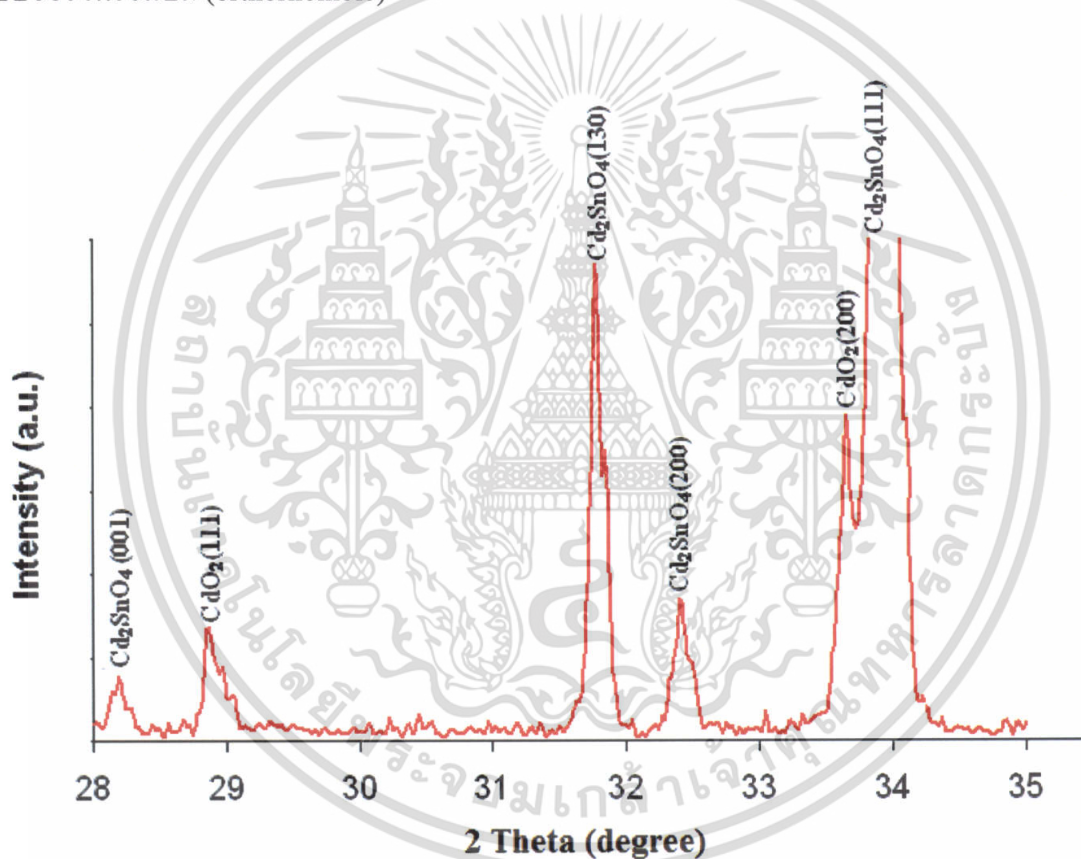


รูปที่ 4.3 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าในช่วง $0 \leq x \leq 0.1$ จะพบเฟสของ Cd_2SnO_4 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ ชนิด $R\bar{3}m$ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (130) ที่มุม 2θ ประมาณ 31° (200) ที่มุม 2θ ประมาณ 32° (021) ที่มุม 2θ ประมาณ 33° (041) ที่มุม 2θ ประมาณ 46° (221) ที่มุม 2θ ประมาณ 47° (241) ที่มุม 2θ ประมาณ 57° (311) ที่มุม 2θ ประมาณ 58° ดังนั้นสรุปได้ว่า ถึงแม้ว่าปริมาณการเจือ Bi จะเพิ่มขึ้นแต่โครงสร้างผลึกก็ไม่เปลี่ยนแปลงยังคงมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โทโรมบิก (orthorhombic)

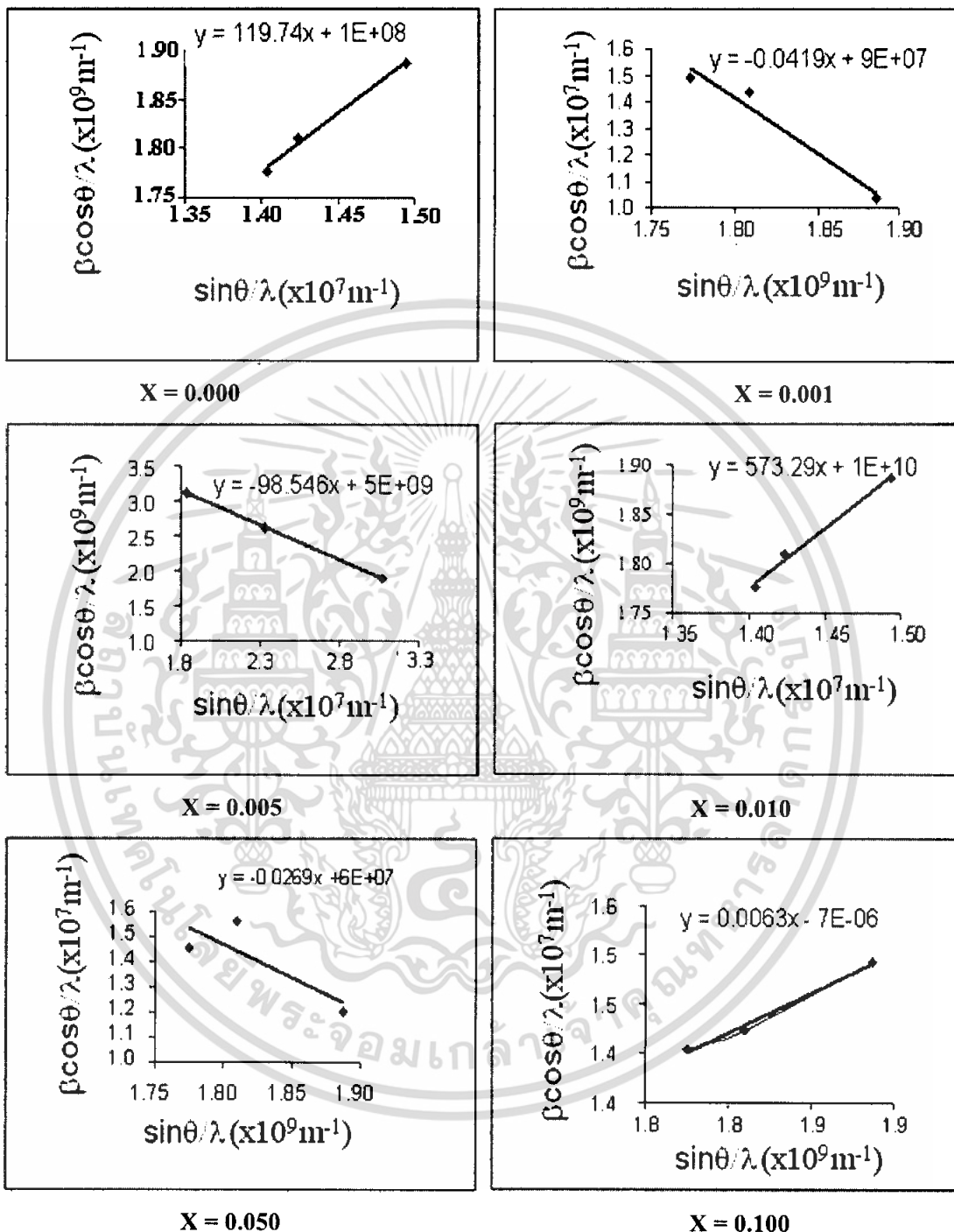


รูปที่ 4.4 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์

$Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x=0.100$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

จากรูปที่ 4.4 จะได้ว่าเมื่อเราทำการเจือปริมาณสารเจือบิสมัทเพิ่มขึ้นจะพบว่าปรากฏพิคของ CdO_2 เพิ่มขึ้นมาที่ (111) ที่มุม 2θ ประมาณ 29° และที่ (200) ที่มุม 2θ ประมาณ 33.4°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

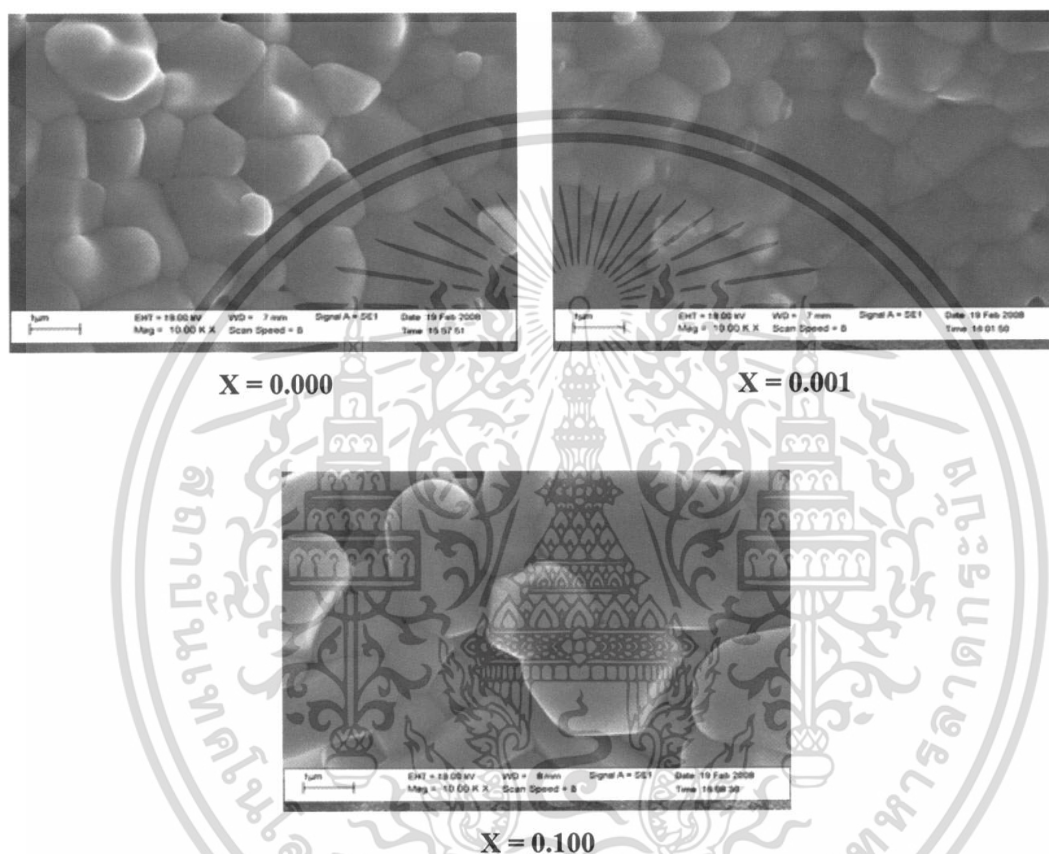
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of Bi	Lattice Constant (Å)			Grain size (nm)	Strain	Dislocation density (cm^{-2})
	a	b	c			
0	5.539	9.800	3.161	10.00	119.74	1.00×10^{21}
0.001	5.532	9.832	3.179	11.11	0.042	8.10×10^{19}
0.005	5.533	9.872	3.219	0.20	98.546	2.50×10^{23}
0.010	5.524	9.796	3.172	0.10	573.29	1.00×10^{24}
0.050	5.518	9.793	3.172	16.77	0.027	3.55×10^{19}
0.100	5.588	9.997	3.268	33.33	0.006	9.00×10^{18}

จากตารางที่ 4.1 จะได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของเกรนมีแนวโน้มลดลงจนถึงระดับปริมาณสารเจือ Bi เท่ากับ 0.01 แต่เมื่อปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้นจาก 0.01 แล้วขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น

4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

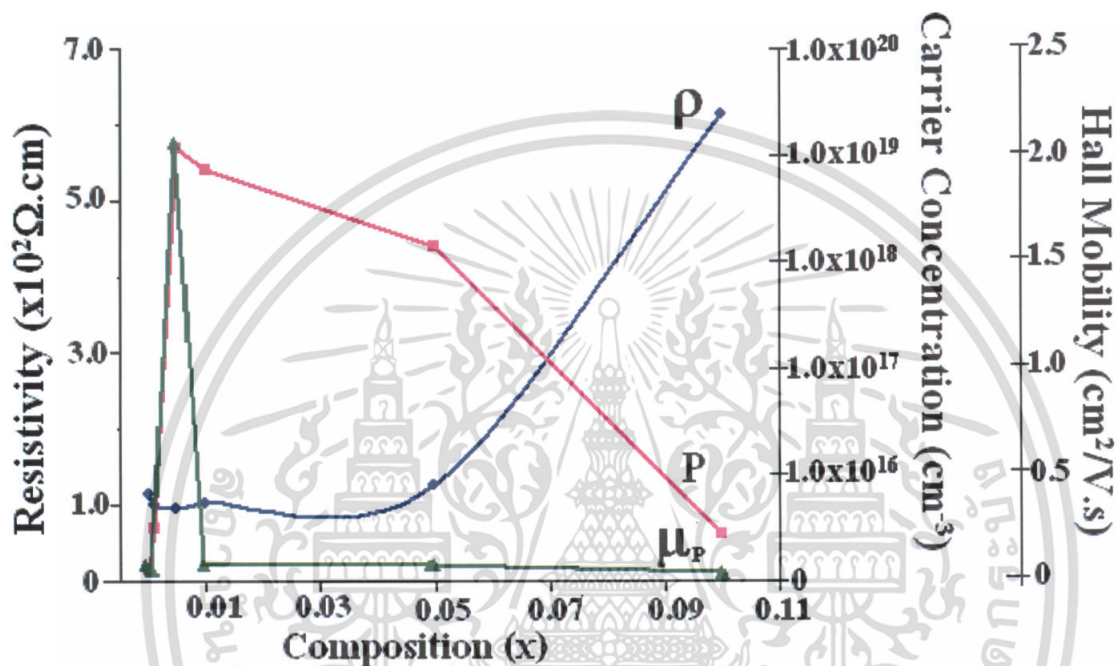


รูปที่ 4.6 แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x = 0.000, 0.001$ และ 0.100) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

จากรูปที่ 4.6 จะได้ว่าสารประกอบเซรามิกส์ที่เจืออยู่ในราว $1 \mu m$ แต่ถ้าปริมาณสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.1 จะทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นถึง $3 \mu m$ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่ได้จาก XRD แสดงว่า Bi ที่เจือเข้าไปทำให้ขนาดของเกรนโตขึ้น

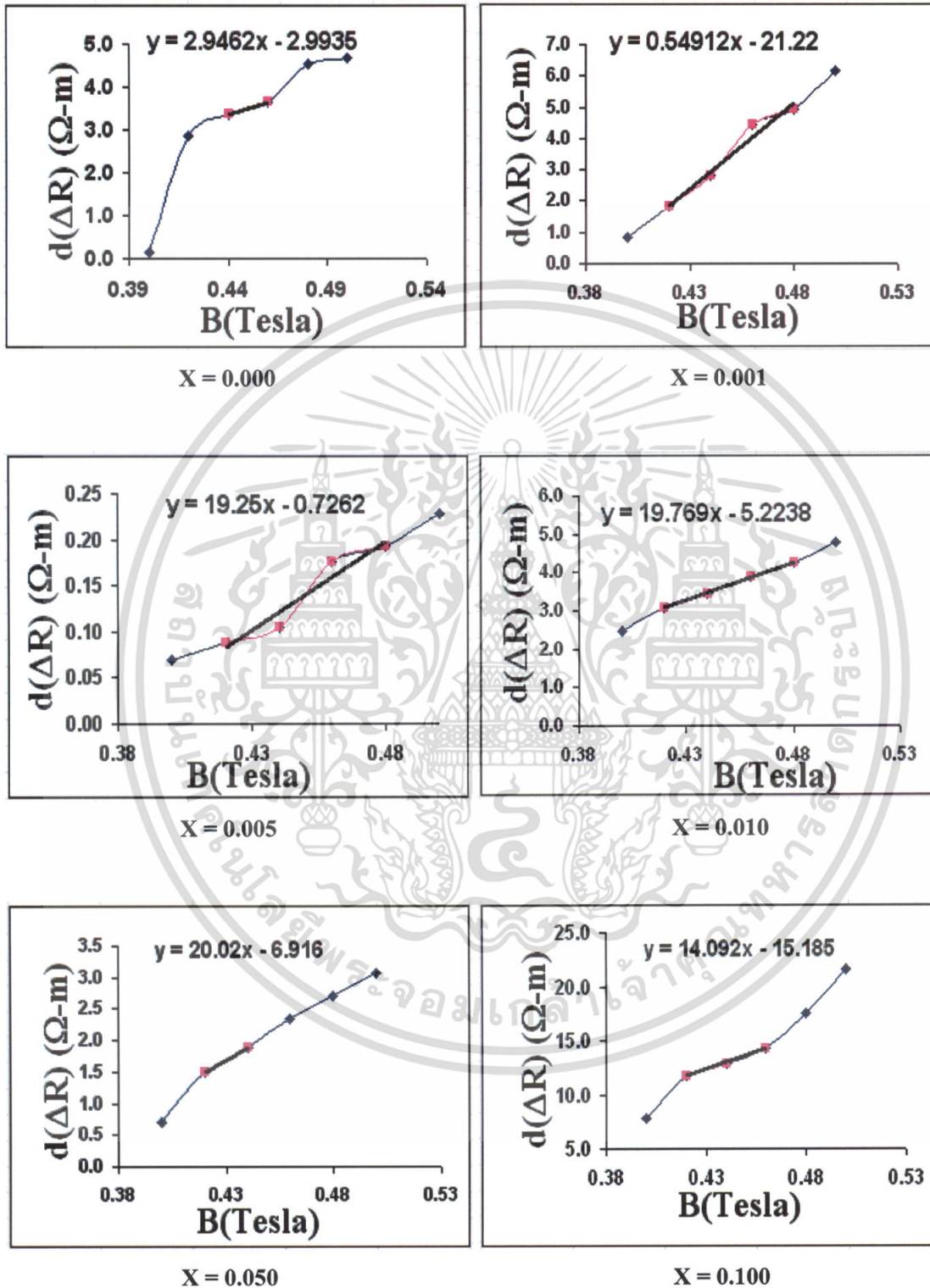
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) สภาพคล่องของโฮล (μ_p) และความหนาแน่นของโฮล (p) ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d(\Delta R)$ ($\Omega\text{-m}$) กับ B (Tesla) ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสาร

ตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

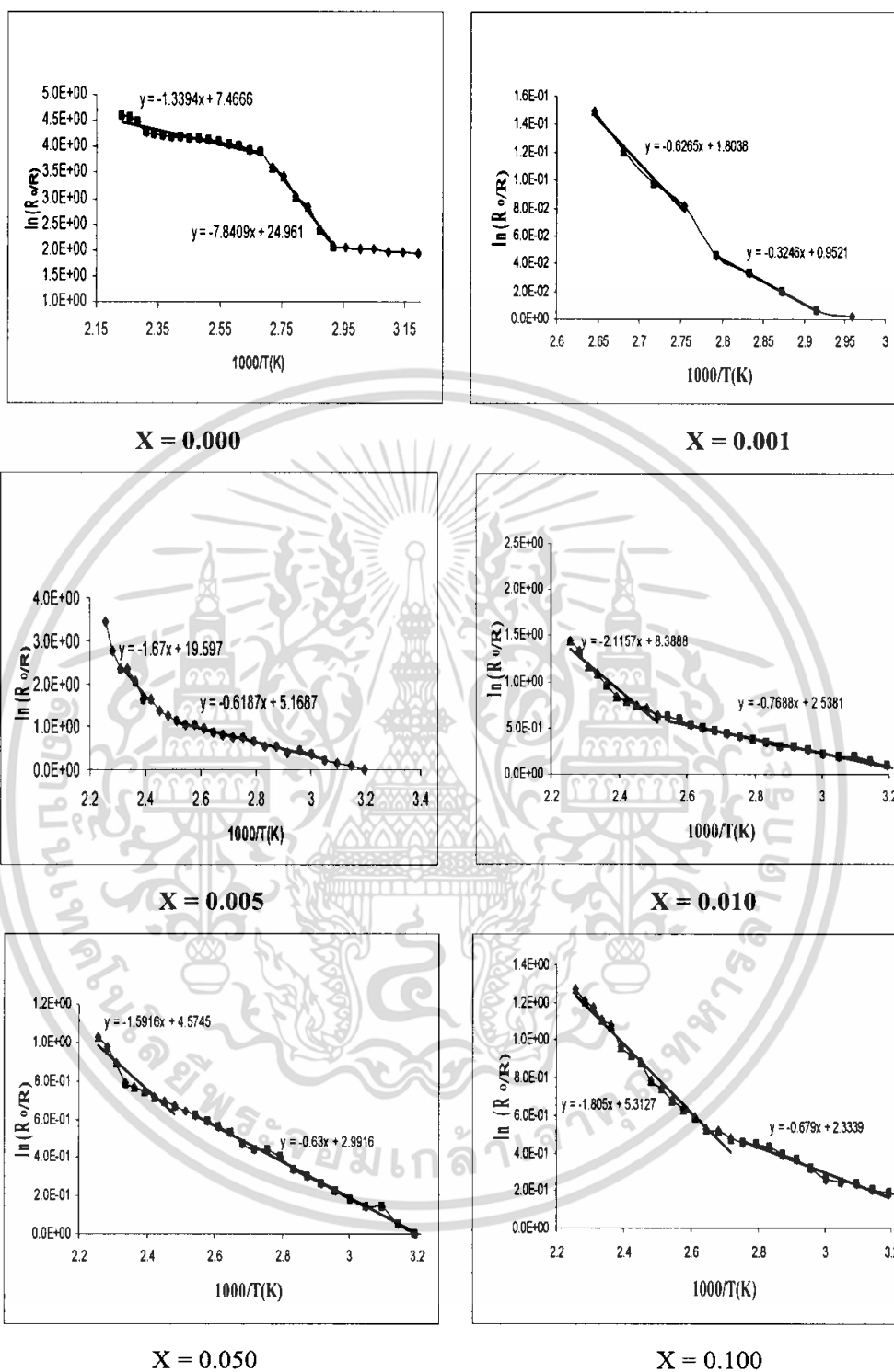
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าค่าคงที่ของฮอลล์ ความหนาแน่นของโฮลสภาพคล่องพาหะและระยะปลอดการชนของสารประกอบ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงลิก

Composition (x) of Bi	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^2/C)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Mean Free Path(\AA)
0.000	11.40	2.95	2.12×10^{18}	0.05	2.29
0.001	10.50	0.55	1.14×10^{19}	0.25	6.54
0.005	9.50	19.30	3.25×10^{17}	2.03	28.40
0.010	10.20	19.80	3.16×10^{17}	1.93	28.80
0.050	12.70	20.00	3.12×10^{17}	1.57	21.70
0.100	61.4	14.00	9.77×10^{16}	0.22	2.06

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าถ้าปริมาณการเจือ $\text{Bi} \leq 0.005$ ค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงแสดงว่า Bi^{3+} แทนที่ Cd^{2+} แต่ถ้าปริมาณการเจือ $\text{Bi} > 0.005$ ค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้า จะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่า Bi^{3+} เข้าไปแทนที่ใน Sn^{4+} ส่งผลทำให้เกิดโฮลเพิ่มขึ้นและจะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนอิสระลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าสัมพัทธ์เทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของ สารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

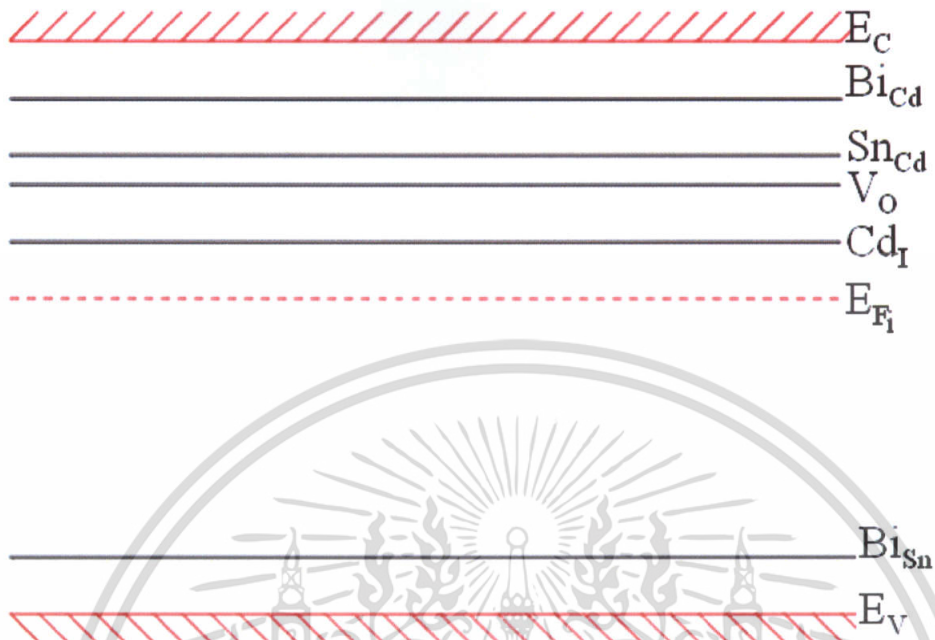
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานกระตุ้นของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)
ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

Composition (x) of Bi	Activation Energy (meV)		
	E_1	E_2	E_3
0.000	-	115	676
0.001	-	140	-
0.005	53	137,144	-
0.010	66	182	-
0.050	61	146	-
0.100	58	155	-
Point Defect Type	Bi_{Cd}	Sn_{Cd}	V_O

หมายเหตุ : รัศมีไอออน $\text{Cd}^{2+} = 0.95 \text{ \AA}$, $\text{Sn}^{3+} = 0.69 \text{ \AA}$, $\text{O}^{2-} = 1.22 \text{ \AA}$, $\text{Bi}^{3+} = 1.03 \text{ \AA}$

จากตารางที่ 4.3 ในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Bi ที่ $0 \leq x \leq 0.001$ จะเกิดระดับพลังงาน 2 ระดับคือ ระดับพลังงานของ Bi_{Cd} และระดับพลังงาน Sn_{Cd} แต่เมื่อมีการเจืออะตอมของ Bi เพิ่มขึ้นนั้น ระดับพลังงานทั้งสองจะหายไป และจะเกิดระดับพลังงาน V_O ขึ้นแทน หรือจะได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.005 แต่เมื่อปริมาณสารเจือมีค่ามากกว่า 0.005 แล้วปริมาณพาหะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นอะตอมของ Bi จะเริ่มเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมของ Cd ซึ่งพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงาน Bi_{Cd} มีค่าอยู่ในช่วง 54-66 meV แต่เมื่อปริมาณสารเจือที่มากกว่า 0.005 Bi จะเริ่มเข้าไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของ Sn ซึ่งการที่อะตอมของ Cd เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของ Sn นี้ก่อให้เกิดโฮล ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสุทธิจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้น (ดังนั้นปริมาณสารเจือควรเจือไม่เกิน (0.5%))



รูปที่ 4.10 แสดงระดับพลังงานของ $\text{Cd}_{2(1-x)}\text{Bi}_x\text{SnO}_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)

จากรูปที่ 4.10 เป็นรูปที่แสดงระดับพลังงานของ $\text{Cd}_2\text{SnO}_4:\text{Bi}$ โดยที่ Cd_2SnO_4 เป็นชนิดเอ็น เนื่องจากว่าเมื่อเราเจือ Bi เข้าไปทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะ มีค่าลดลงอาจเนื่องมาจาก Bi เข้าไปแทนที่ Sn จึงทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับซึ่งทำให้การนำไฟฟ้ามีค่าลดลง

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	19
2.2.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	20
2.2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก	20
2.2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนซิก	23
2.2.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	27
2.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	28
2.2.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	30
2.2.5 ปრაกฏการณ์ฮอลล์	31
2.2.6 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	36
2.3 การเกิดปฏิกิริยาสารละลายของแข็ง	39
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	41
3.1 การเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4 (0 \leq x \leq 0.1)$ โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	41
3.1.1 สารตั้งต้นและเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4 (0 \leq x \leq 0.1)$	41
3.1.2 การคำนวณเพื่อเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4 (0 \leq x \leq 0.1)$	42
3.1.3 การผสมสาร	46
3.1.4 การอัดเม็ดสาร	47
3.1.5 ขั้นตอนการเผาสาร	47
3.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4 (0 \leq x \leq 0.1)$	49
3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	49
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	49
3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การวัดความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	49
3.2.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
4.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	52
4.1.1 สารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดย วิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็น ผงผลึก	52
4.1.2 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	53
4.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	57
4.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็น สารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัยของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่ เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึก	64
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	69
ประวัติผู้เขียน	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นเตรียมสารตัวอย่างในแบบเซรามิกส์ จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของสารตัวอย่าง รวมทั้งยังได้ทำการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง อีกทั้งยังได้ให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัยของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดย ปฏิกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

จากการศึกษาด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าในช่วง $0 \leq x \leq 0.1$ จะพบเฟสของ Cd_2SnO_4 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบชนิด $R\bar{3}m$ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (130) ที่มุม 2θ ประมาณ 31° (200) ที่มุม 2θ ประมาณ 32° (021) ที่มุม 2θ ประมาณ 33° (041) ที่มุม 2θ ประมาณ 46° (221) ที่มุม 2θ ประมาณ 47° (241) ที่มุม 2θ ประมาณ 57° (311) ที่มุม 2θ ประมาณ 58° ดังนั้นสรุปได้ว่าถึงแม้ว่าปริมาณการเจือ Bi จะเพิ่มขึ้นแต่โครงสร้างผลึกก็ไม่เปลี่ยนแปลงยังคงโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และเมื่อเราทำการเจือปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้นจะพบว่าปรากฏฟิสิกของ CdO_2 เพิ่มขึ้นมาที่ (111) ที่มุม 2θ ประมาณ 29° และที่ (200) ที่มุม 2θ ประมาณ 33.4°

สำหรับการศึกษาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ จะได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของเกรนมีแนวโน้มลดลงจนถึงระดับปริมาสารเจือเท่ากับ 0.01 แต่เมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นจาก 0.01 แล้วขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น

จากภาพถ่ายของ SEM จะได้ว่าสารประกอบเซรามิกส์ที่เจืออยู่ในราว $1\mu m$ แต่ถ้าปริมาณสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.1 จะทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นถึง $3\mu m$ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของเกรนที่ได้จาก XRD แสดงว่า Bi ที่เจือเข้าไปทำให้ขนาดของเกรนโตขึ้น

การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) จะเห็นได้ว่าถ้าปริมาณการเจือ $Bi \leq 0.005$ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงแสดงว่า Bi^{3+} แทนที่ Cd^{2+} แต่ถ้าปริมาณการเจือ $Bi > 0.005$ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่า Bi^{3+} เข้าไปแทนที่ใน Sn^{4+} ส่งผลทำให้เกิดโฮลเพิ่มขึ้นและจะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนอิสระลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพลังงานกระตุ้นของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) นั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงปริมาณการเจือของอะตอม Bi ที่ $0 \leq x \leq 0.001$ จะเกิดระดับพลังงาน 2 ระดับคือ ระดับพลังงานของ Bi_{Cd} และระดับพลังงาน Sn_{Cd} แต่เมื่อมีการเจืออะตอมของ Bi เพิ่มขึ้นนั้น ระดับพลังงานทั้ง 2 จะหายไปและจะเกิดระดับพลังงาน V_0 ขึ้นแทนหรือจะได้ว่าเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของสารเจือมีค่าเท่ากับ 0.005 แต่เมื่อปริมาณสารเจือมีค่ามากกว่า 0.005 แล้วปริมาณพาหะจะมีแนวโน้มลดลงแสดงว่าปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้นอะตอมของ Bi จะเริ่มเข้าแทนที่ในตำแหน่งของอะตอมของ Cd ซึ่งพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงาน Bi_{Cd} มีค่าอยู่ในช่วง 54-66 meV แต่เมื่อปริมาณสารเจือที่มากกว่า 0.005 Bi จะเริ่มเข้าแทนที่ตำแหน่งอะตอมของ Sn ซึ่งการที่อะตอมของ Cd เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของ Sn นี้ ก่อให้เกิดโหนดของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสุทธิจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ Bi เพิ่มขึ้น (ดังนั้นปริมาณสารเจือควรเจือไม่เกิน 0.5%) ซึ่งจะเห็นได้ว่า Cd_2SnO_4 เป็นชนิดเอ็นเนื่องจากว่าเมื่อเราเจือ Bi เข้าไปทำให้ค่าความหนาแน่นของพาหะมีค่าลดลงอาจเนื่องมาจาก Bi เข้าไปแทนที่ Sn จึงทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับซึ่งทำให้การนำไฟฟ้ามีค่าลดลง

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ควรเจือ Bi ไม่เกิน $x = 0.005$
2. เนื่องจาก Bi แทนที่ได้ทั้ง Cd และ Sn ดังนั้นควรเลือกราคาหุ้ม 5 เช่น Sb จะทำให้ Sb แทนที่ Sn แต่เพียงอย่างเดียว
3. อาจเพิ่มปริมาณของ Sn ให้มากกว่า สโตยคิโอเมตริเพื่อให้ Sn แทนที่ Cd แล้วเกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
ตารางที่ 2.2	แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
ตารางที่ 2.3	แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
ตารางที่ 2.4	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
ตารางที่ 3.1	แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	46
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	56
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และสภาพคล่องพาหะของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	60
ตารางที่ 4.3	แสดงพลังงานกระตุ้นของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	9
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกสปีเนล	10
รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกชนิดต่างๆ	12
รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	12
รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	13
รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตของเกรน	13
รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบร์รอก์	15
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	16
รูปที่ 2.11 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	17
รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	24
รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง	27
รูปที่ 2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	27
รูปที่ 2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	29
รูปที่ 2.17 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	30
รูปที่ 2.18 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
รูปที่ 2.19 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	33
ก. ก่อนใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x	
ข. หลังใส่สนามแม่เหล็กในทิศแกน x	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.20	การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	37
รูปที่ 2.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d \cdot \Delta R_{MNOP}$ กับค่าสนามแม่เหล็ก B	38
รูปที่ 2.22	แสดงสารละลายของแข็งแบบซัปสตีติวชันัล	39
รูปที่ 2.23	แสดงสารละลายของแข็งแบบอินเตอร์สตีเชียล	40
รูปที่ 3.1	แสดงภาพชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	46
รูปที่ 3.2	แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเตาเผา	47
รูปที่ 3.3	แสดงเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	48
รูปที่ 3.4	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	50
รูปที่ 3.5	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ	51
รูปที่ 3.6	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า	51
รูปที่ 4.1	แสดงสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสาร CdO , SnO และ $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ บดรวมกันและนำไปอัดเป็นเม็ดผงผลึก	52
รูปที่ 4.2	แสดงสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	53
รูปที่ 4.3	แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	53
รูปที่ 4.4	แสดงพีคความเข้มขึ้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x=0.100$) ที่เตรียมได้โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	54
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\beta \cos \theta / \lambda$ กับ $\sin \theta / \lambda$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงรูปถ่าย SEM ของผิวหน้าของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($x=0.000, 0.001$ และ 0.100) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	57
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) สภาพคล่องของโฮล (μ_p) และความหนาแน่นของโฮล (p) ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	58
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d(\Delta R)(\Omega\text{-m})$ กับ $B(\text{Tesla})$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	59
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าสัมพัทธ์เทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิของสารประกอบเซรามิกส์ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$) ที่เตรียมโดยปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	61
รูปที่ 4.10 แสดงระดับพลังงานของ $Cd_{2(1-x)}Bi_xSnO_4$ ($0 \leq x \leq 0.1$)	63



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ Cd_2SnO_4 ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS
(The Joint Committee on Power Diffraction Standards)

Pattern : 70-2403		Radiation = 1.540600				Quality:Calculated	
Indexed							
Cd_2SnO_4		2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	
Cadmium Tin Oxide		17.927	2	0	2	0	
Lattice : Orthorhombic		18.327	10	1	1	0	
S.G. : Pbam (55)		24.095	8	1	2	0	
Mol. Weigth = 407.51		27.920	9	0	0	1	
Volume[CD] = 175.10		31.551	100	1	3	0	
DX = 7.729		32.256	33	2	0	0	
a = 5.54600	Z = 2	33.379	42	0	2	1	
b = 9.88800		33.604	84	1	1	1	
c = 3.19300		36.313	3	0	4	0	
a/b = 0.56088		37.206	1	1	2	1	
c/b = 0.32292		39.895	9	1	4	0	
		42.267	10	2	3	0	
		*42.267	10	2	3	1	
		43.175	<1	0	0	1	
ICSD COLLECTION CODE :009010		44.182	4	2	1	1	
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.		46.147	4	1	4	1	
		47.100	1	2	2	1	
		48.854	1	1	5	0	
		49.397	6	3	4	0	
		*49.397	8	2	4	1	
		50.162	10	3	2	0	
		51.682	31	0	5	1	
		52.828	31	3	4	0	
		55.733	15	2	4	0	
		57.076	15	1	1	0	
*Calculated from ICSD using POWD-		57.209	8	2	3	0	
12++,(1997) primary reference:		*57.209	8	0	2	1	
		57.697	5	1	6	1	
*Z.Anorg.Alg.Chem.,volume371,page237,(1969):		58.384	3	3	3	2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CdO_2 ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS
(The Joint Committee on Power Diffraction Standards)

Pattern : 76-1721		Radiation = 1.540600					Quality:Calculated	
Indexed								
CdO_2		2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>		
Cadmium Oxide		29.088	100	1	1	1		
Lattice : Cubic		33.712	100	2	0	0		
S.G. : Pa3 (205)		37.833	1	2	1	0		
a = 5.31300		41.604	1	2	1	1		
Z = 4		48.419	52	2	2	0		
Mol. Weigth = 144.41		51.564	<1	2	2	1		
Volume[CD] = 149.98		57.483	24	3	1	1		
DX = 6.396		60.297	14	2	2	2		
Dm = 5.930		63.033	1	0	2	3		
I/lcor = 5.84		65.705	<1	3	2	1		
ICSD COLLECTION CODE :009010		70.892	4	4	0	0		
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.		73.423	<1	4	1	0		
TEST FROM ICSD : Calc .density unusual but tolerable		75.920	<1	4	1	1		
		78.391	7	3	3	1		
		80.841	12	4	2	0		
		83.273	<1	4	2	1		
		85.692	<1	3	3	2		
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997) primary reference: *Z.Anorg.Alg.Chem.,volume371,page237,(1969):								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเกวลี มุหุตตา เกิดเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ.2527 เป็นคนลำปางโดยกำเนิด สำเร็จ การศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนลำปางกัลยาณี และได้เข้ารับการศึกษาระดับ อุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

นางสาวปัทศร วัตโส เกิดเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ.2528 เป็นคนนครพนมโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนธาตุพนม และได้เข้ารับการศึกษาระดับ อุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

นางสาวศิวพร ภู่ออด เกิดเมื่อวันที่ 8 สิงหาคมพ.ศ.2527 เป็นคนกรุงเทพฯโดยกำเนิด สำเร็จ การศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนบางกะปิ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษาใน สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม กเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Banejee A. N., Panda D. and Chattopadhyay K. K. 2004. Fabrication of p-CuAlO₂/n-ZnO:Al heterojunction diodes for transparent electrodes. **Proceedings in Photonics** . 9-11 December, Cochin, India
- 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. pp. 200-204.
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-Ray Diffraction** . Addison-Wesley Publishing Company Inc., 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.
- Dietsch K. S. r, 1998 **Semiconductor Material and Device Characterization** 2nd ed., New York: John Wiley & Sons Inc.
- Gaewdang T., Chaminade J.P., Garcia A., Fouassier C., Pouchard M., Hagenmuller P. Jacquier B. 1993. Crystal growth and luminescence properties of In₆WO₁₂. **Mater. Lett.** 18: 64-68.
- Gaewdang T., Chaminade J.P., Gravereau P., Garcia A., Fouassier C., Hagenmuller P. 1993. Crystal structure and luminescent properties of indium titanate. **Mat. Res. Bull.**, 28:1051-1060.
- Gaewdang T., Chaminade J.P., Garcia A., Pouchard M., Hagenmuller P., Jacquier B.1994. Luminescence of Ce³⁺ in the In_xSC_{1-x}BO₃ (0 ≤ x ≤ 1) solid Solution. **J. Phys. Chem. Solid.** 55:501-504.
- Hearle J. W.S., Sparrow J.T., Cross P. M. 1973. **The Use of the Scanning Electron Microscope.**, New York: Pergamon Press Ltd.
- Kittel C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc
- Mamazza, Jr., Don L. Morel and Christos S. Ferekides.2005 .Transparent conducting oxide thin films of Cd₂SnO₄ prepared by RF magnetron co-sputtering of the constituent binary oxides.**Thin Solid Films.** 484: 26-33.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Manifacier J.C., Gasiot J., Fillard J.P. 1976. A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n , k and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**. 9 : 1002-1004.
- Moore D. M., Reynolds Jr. R. C. 1989. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press Inc.
- Ohring M. 2002. **Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure**. 2nd ed. San Diego: ACADEMIC PRESS.
- Runyan W. R.1975. **Semiconductor Measurement and Instrument** 3rd ed., New York: Mc Graw-Hill.
- Zribi M., Kanzari M., Rezig B. 2005. **Optical Constants of Na-Doped CuInS₂ Thin Films**. **Material Letters**. , 60 : pp. 98-103.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2545 การเตรียมและ
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัย
เสนอ ต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์
($CuInSe_2$). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม
ไดซีลีไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- วีรชัย ลิภา. 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cds-ZnS$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อุปถัมภ์ นาครักษ์. 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวง
ซึ่งเตรียมวิธีแผ่นอะออสสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์
แสงอาทิตย์ $CdTe$. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์. 2538. ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ควบคุม
โดยวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คูสิต เครื่องงาม. 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1
กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมเกียรติ สุขเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้