

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยการระเหยสาร
ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



นายเลอพงศ์ รักธรรม
นายอภิรัตน์ มีมุข

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

ล/ท.
๗๘๑๗ ๗
๒๕๔๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
โดยไม่การณใด ๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

58708

31 ส.ค. 2549

๒๐๖๐
๒

**Study of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films Prepared by Thermal
Evaporation in Vacuum**



Mr. Apirat Meemoosor

Mr. Lerpong Rakthum

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

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science





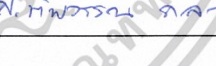
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
นักศึกษา นายเลอพงศ์ รักธรรม
 นายอภิรัตน์ มีมุข
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

กรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.งามนิตย์ แก้วแดง	
กรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ	
กรรมการ รศ.อนุพงศ์ สรวงประภา	
กรรมการ อาจารย์ ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

.....
ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชะธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
นักศึกษา	นายเลอพงศ์ รักธรรม นายอภิรัตน์ มีมุขอ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทำโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เคลือบลงบนกระจกสไลด์จากสารตั้งต้นแคดเมียมซัลไฟด์และซิงค์ซัลไฟด์ความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่ตกตะกอนในอ่างเคมี ในกรณีที่สัดส่วนโมลของ ZnS ต่ำกว่า 0.9 โครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้จะเป็นแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ทซ์ไฮท์ แต่เมื่อ $x > 0.9$ แล้วโครงสร้างที่ได้จะเป็นแบบคิวบิก ซิงค์เบลนด์ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.31 ไปเป็น 3.5 eV เมื่อปริมาตรของ Zn เพิ่มขึ้น จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าถ้าสัดส่วนโมลของ ZnS มากขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง สำหรับค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ยังไม่ได้เอลนีส จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม Zn ที่เจือ และค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงกว่าเดิมเมื่อมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด (ELH) นอกจากนี้ยังพบว่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีสองค่าทั้งนี้อาจเกิดจากระดับพลังงานย่อยที่เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน

Special Project Title	Study of $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum
Name	Mr. Lerpong Rakthum Mr. Apirat Meemoosor
Department	Applied Physics, Faculty of Science
Program	Applied Physics
Academic Year	2004
Special project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Geawdang
Special project co-advisor	Assist.Prof.Dr.Chaisingh Poo-Rakkiat

Abstract

In this special project, $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin film have been prepared on slide glass substrate by thermal evaporation by using different precursors: high purity (99.999%) of CdS and of ZnS and powder precipitated from solution in chemical bath. When the ZnS mole ratio was less than 0.9, the crystal structure $Cd_{1-x}Zn_xS$ film was hexagonal wurtzite. However, for $x > 0.9$ the $Cd_{1-x}Zn_xS$ film were grown with cubic zinblende structure. As the ZnS mole ratio increases, the energy gap values of $Cd_{1-x}Zn_xS$ film varies from 2.31 eV for CdS to 3.47 eV for ZnS. The SEM micrographs show that the grain size decreases when the Zn concentration increases. Electrical sheet resistance at room temperature of $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films increases as a function of Zn concentration but the sheet resistance decreases under illumination using a halogen (ELH) lamp. The three activation energy may be attributed to the barrier height and/or trap states appearing at intergrain boundary.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึง การปลูกฝังสิ่งที่ตั้งมให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ สิ่งแวดล้อม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิล- บีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3101 PC ที่ใช้ในการ ศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นย่าน อัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 300-2500 nm)

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย และ คุณวิน บรรจงปรุ แห่งศูนย์เทคโนโลยีไมโคร- อิเล็กทรอนิกส์ จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ FESEM ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-370 Scanning Microscope ในการศึกษาลักษณะผิวหน้าของสารตัวอย่าง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณ กัญญา สิริโกชนัน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า- คุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV-Visible Spectrometer JASCO 7600)ที่มีความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอ- เลตและย่านที่ตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง และให้ความกรุณาอนุเคราะห์ การใช้เครื่องซังสารที่แสดงสเกลละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปดลประจุมมาใช้ในการทดลองโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 1.5406 \AA ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์อนุพงษ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสารอิเล็กโตรมิเตอร์ในการวัดสภาพต้านทานแผ่น และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง และชุดวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) ตลอดจนยูวี-วิสทิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ ที่มีความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านที่ตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร และกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์วงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ, คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ และคุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม
เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ในการ
ทดลองสำหรับการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณอุปถัมภ์ นาครักษ์, คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์, คุณสุกฤษฎี เกิดแสง และคุณ
พิมล ศิริพจนาวรรณ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง และซ่อม
อุปกรณ์สเปย์ไฟโรไลซิส, แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรม
เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาระดับ
มัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนใน
การศึกษาล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

เลอพงศ์ รักรธรรม
อภิรัตน์ มีมุขอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโรงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.1.1 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	6
2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ	8
2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	9
2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	10
2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวร์ทไซต์	11
2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	12
2.1.1.3.1 ซ็อกบพร่องผลึกแบบจุด	13
2.1.1.3.2 ซ็อกบพร่องผลึกเชิงเส้น	13
2.1.1.3.3 ซ็อกบพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	14
2.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก	15
2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน	19
2.2.1.1 โลหะสารกึ่งตัวนำ และฉนวน	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	21
2.2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	23
2.2.3 การส่งผ่านแสง	24
2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง	26
2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	28
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้า	28
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	29
2.3.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	30
2.3.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
2.3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	33
2.3.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ	36
2.4 เทคโนโลยีสุญญากาศและเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	38
2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซในอุดมคติ	38
2.4.1.1 การกระจายความเร็วของโมเลกุล	38
2.4.1.2 ความดัน	40
2.4.1.3 การชนของก๊าซบนพื้นผิว	41
2.4.2 การลำเลียงก๊าซและการปั๊ม	42
2.4.2.1 ระบบการไหลของก๊าซ	42
2.4.2.2 การนำก๊าซ	42
2.4.2.3 อัตราเร็วของการปั๊ม	43
2.4.3 ปั๊มสุญญากาศ	46
2.4.3.1 ปั๊มพกลโรตารี	46
2.4.3.1.1 ปั๊มพกลโรตารีแบบแวน	46
2.4.3.1.2 ปั๊มพกลโรตารีแบบลูกสูบ	48
2.4.3.1.3 จังหวะของปั๊ม	49
2.4.3.1.4 ก๊าซบัลลาสต์	50
2.4.3.2 ปั๊มไอฟุ้งกระจาย	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.4 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร	52
2.4.4.1 อัตราการระเหยสาร	52
2.4.4.2 ความดันไอของธาตุ	53
2.4.4.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	54
2.4.4.3.1 แหล่งกำเนิดชนิดหลอดทั้งสแตน	54
2.4.4.3.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะลงรูป	55
2.4.4.3.3 เตาระเหย	55
2.4.4.3.4 เป้าหลอม	55
2.4.4.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน	56
2.4.4.4 การระเหยสารประกอบ	56
2.4.4.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหย	57
2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	59
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	62
3.1 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	62
3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	63
3.3 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ	64
3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_xS$)	65
3.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	67
3.5.1 อุปกรณ์	67
3.5.2 วิธีวัดความต้านทานของฟิล์มบาง	67
3.6 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	68
3.6.1 อุปกรณ์	68
3.6.2 วิธีการทดลอง	69
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	71
4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%	71
4.1.2 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี	71
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	72
4.3 ผลการศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	75
4.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$	81
4.5 ผลการทดลองความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$	89
4.6 ผลความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาพลังงานกระตุ้น	91
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	96
5.1 สรุปผลการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	96
5.2 สรุปผลการศึกษสมบัติฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	96
5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข	97
เอกสารอ้างอิง	99
ภาคผนวก	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของโครงผลึกของหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ	5
ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้ง 7 แบบในระบบ 3 มิติ	5
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของคชนิมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	8
ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	57
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1g) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%	64
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล	74
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล	83
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล	88
ตารางที่ 4.4 แสดงสภาพความต้านทานไฟฟ้าในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล	89
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล	91
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีเมื่อ ไม่มีการแอนนีสล	93

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ	4
รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก	7
รูปที่ 2.3 แสดงพันธะเตตระฮีดรอนของสารประกอบของอะตอมของธาตุกลุ่ม 2-6	9
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	9
รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS	10
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS	11
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์	12
รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	13
รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	14
รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	14
รูปที่ 2.11 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน	15
รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	16
รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	18
รูปที่ 2.15 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของ <ul style="list-style-type: none"> (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ (ค) ฉนวน 	20
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์อนสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ <ul style="list-style-type: none"> (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง 	22
รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ <ul style="list-style-type: none"> (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน 	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.18 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	23
รูปที่ 2.19 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	24
รูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	25
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บ่งชี้จะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	27
รูปที่ 2.22 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง	29
รูปที่ 2.23 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	30
รูปที่ 2.24 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
รูปที่ 2.25 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเคลื่อนขั้วไฟฟ้า	33
รูปที่ 2.26 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	34
รูปที่ 2.27 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่วางเรียงในแนวเส้นตรง (ก) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความหนามาก (ข) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความยาวเพียง d	36
รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(v)$ กับ v ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	39
รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ-ท่อ-ปั๊มพี (ก) ผนังภาชนะไม่มีการจับก๊าซ (ข) ผนังภาชนะมีการจับก๊าซ	44
รูปที่ 2.30 ค่าของการนำก๊าซในท่อรูปร่างต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที	45
รูปที่ 2.31 แสดง โครงสร้างของโรตารีปั๊มพีชนิดแวน	47
รูปที่ 2.32 แสดงจังหวะการทำงาน 4 จังหวะของปั๊มพีชนิดแวน	47
รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะภายในของปั๊มพีกลโรตารีแบบลูกสูบ	49
รูปที่ 2.34 ปั๊มพีกล 2 จังหวะ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.35 ส่วนประกอบภายในของปั๊มไฟไอฟิงกระจาย	51
รูปที่ 2.36 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	53
รูปที่ 2.37 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ จุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	54
รูปที่ 2.38 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่าง ๆ	55
รูปที่ 2.39 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร	58
รูปที่ 2.40 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	61
รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางในสุญญากาศ	63
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งต่างๆภายในระบบสุญญากาศ	63
รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	67
รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ	69
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	71
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส	72
รูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ต่างๆในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	72
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กับ $a_0, c_0 (Å)$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	74
รูปที่ 4.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส	75
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กับ $a_0, c_0 (Å)$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.7	ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก ผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ถูกตัดแล้วนำไป เคลือบด้วยทอง	76
รูปที่ 4.8	ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณี ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการ แอนนีส ที่ถ่ายด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่า	78
รูปที่ 4.9	ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก ผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ถูกตัดแล้วนำไปเคลือบ ด้วยทอง	76
รูปที่ 4.10	ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณี ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ถ่าย ด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่า	79
รูปที่ 4.11	ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x = 0.2$ ในกรณี ที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ถ่ายด้วย FESEM โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า	80
รูปที่ 4.12	กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่า ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	81
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มี ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อหาค่า E_g	82
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส	83
รูปที่ 4.15	กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่า ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่การ แอนนีส	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 กราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล เพื่อแสดงว่ามี E_g มากกว่า 1 ค่า	85
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล เพื่อการหาค่า E_{g1}	86
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล เพื่อการหาค่า E_{g2}	87
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล	88
รูปที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล ในกรณีไม่ฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH	90
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีสล ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH	90
รูปที่ 4.22 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีสล	92
รูปที่ 4.23 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีเมื่อไม่มีการแอนนีสล	94
รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง CdS – ZnS ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอนโดยที่ ϕ , คือความสูงของกำแพงศักย์ และ x คือระยะทาง	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

จากแนวโน้มในอดีตจนถึงปัจจุบัน สถานะความต้องการพลังงานของมนุษย์นั้นมีค่าเฉลี่ยที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เป็นเหตุให้มนุษย์ต้องหาพลังงานต่างๆมาตอบสนองความต้องการให้เพียงพอและสำรองไว้ตามต้องการ แต่ปัจจุบันพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาตินั้น กำลังจะหมดไป มนุษย์จึงต้องคิดค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆมาทดแทนพลังงานเหล่านี้ พลังงานที่สามารถใช้ได้ทุกๆที่ทั่วโลก ไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและไม่ทิ้งกากที่เป็นขยะ นั่นก็คือพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สะอาดและเหมาะสมที่สุดที่มนุษย์จะได้รับมา

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแรงไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแห่งใหม่ที่ได้รับการสนใจเป็นอย่างมาก สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์(chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Cu(In,Ga)Se_2 ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่อยู่ในรูปของรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของสาร $\text{SiO}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{Mo}$ /แผ่นรองรับที่เป็น แก้วอ่อนหรือ โลหะไร้สนิม ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึง 18.8% และ 17.5% ตามลำดับ [Tuttle, 2000]

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น(n-type) มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง(direct bandgap) มีช่องว่างแถบพลังงาน(energy gap) ณ อุณหภูมิห้องเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์(eV) เป็นฟิล์มที่ได้การยอมรับว่าเหมาะกับการสร้างเป็นชั้นหน้าต่าง สำหรับใช้สร้างประจักษ์เซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำเป็นรอยต่อระหว่างหัวต่อพี-เอ็น (เมื่อฟิล์มบาง CdS มีความหนา 0.1 ไมโครเมตร จะดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่า 2.42 eV ได้ถึง 36%) [Lee; et.al 2003] แต่ข้อจำกัดประการหนึ่งของ CdS ก็คือมีช่องว่างแถบพลังงานที่ไม่กว้างนัก จึงต้องเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานให้กว้างขึ้น ซึ่งทำโดยการผสมกับฟิล์ม ZnS ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน 3.66 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้จะทำให้การจัดเรียงตัวของ CdS กับ ZnS เป็นสารประกอบของ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง จะมี 2 แบบ คือ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก(cubic) หรือเวิร์ทไซท์(wurtzite) ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ยังช่วยให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้นอีกด้วย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมลของสารที่เจือแต่ละสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการศึกษาในส่วนนี้ $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะเตรียมได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่เกิดจากการตกตะกอนในอ่างเคมี และจะศึกษาอัตราส่วนของ ZnS และ CdS ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ประยุกต์ใช้งานกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยใช้เทคนิควิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
3. เพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM และ FESEM)
4. เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
6. วัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาพลังงานกระตุ้น (activation energy)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อ $(0 \leq x \leq 1)$ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% และจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงที่เกิดจากการตกตะกอนในอ่างเคมี และนำฟิล์มบางที่เราเตรียมได้ไปศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ค่าการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสง และสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการพิเศษ
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ
3. ศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM และ FESEM)
4. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
5. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
7. วัดความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาพลังงานกระตุ้น (activation energy)
8. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขของการเจือ ZnS โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ว่ามีอิทธิพลต่อฟิล์มบางอย่างไร
3. ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนผสมของ ZnS ที่ทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพดี เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก

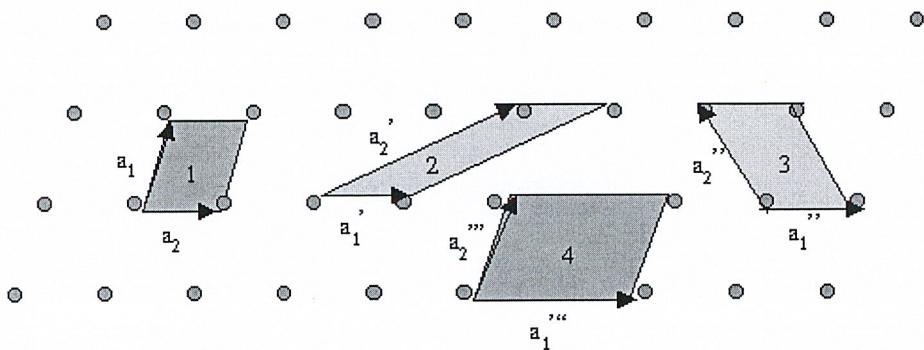
ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline material) และวัสดุที่เป็นอสัณฐาน (amorphous material) ซึ่งในที่นี่จะสนใจแต่วัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; บัญชา, 2544]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือ โมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆอะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆของอะตอมที่ระบบ 3 มิติว่า โครงผลึก (lattice)

ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงผลึก 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 2.1

ในระบบ 2 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และมุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียง 5 แบบ ดังตารางที่ 2.1



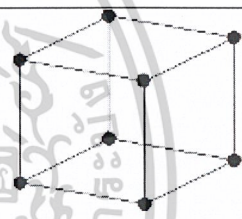
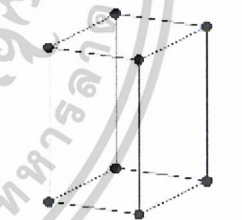
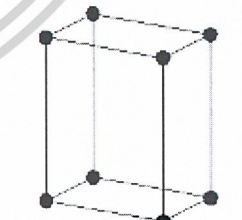
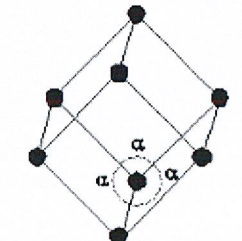
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของโครงผลึกของหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ

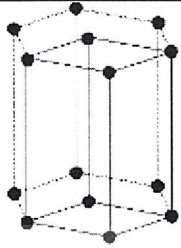
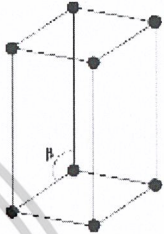
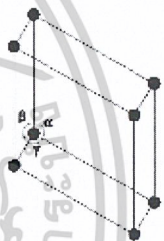
ชนิดของแลตทิซ 2 มิติ	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	มุม
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60° (60° rhombus)	$a = b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมคางหมูทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้ง 7 แบบในระบบ 3 มิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้ง 7 แบบในระบบ 3 มิติ (ต่อ)

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
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)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

ในระบบ 3 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ a , b และ c และมุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบใน 3 มิติ ซึ่งจัดได้เป็น 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก(triclinic), โมนอคลินิก(monoclinic), ออร์โธโรมบิก(orthorombic), เตตระโกนอล(tetragonal), คิวบิก(cubic), รมโบฮีดรอล(rhombohedral) และเฮกซะโกนอล(hexagonal)

2.1.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึง ตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึกมีดังนี้

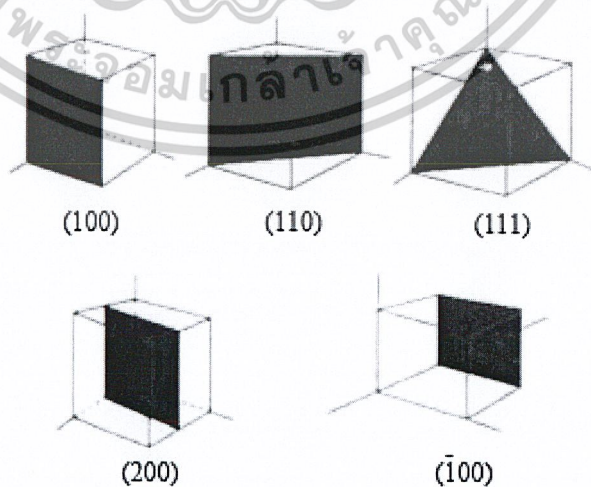
1. การระบุตำแหน่ง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น x,y,z (ให้สังเกตเครื่องหมาย "," ซึ่งคั่นแต่ละค่า) ตัวอย่าง จุด 1,2,3 หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1,y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทาง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ (ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย "," คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า)

ตัวอย่าง การระบุทิศทางที่ศึกษาจะใช้แนวที่ผ่านจุดเริ่มต้นของแกนผลึก คือ ที่จุด $0,0,0$ ซึ่งสามารถใช้ค่าเดียวกันนี้ระบุทุกๆ แนวทิศทางที่ขนานกัน และจะใช้จุดที่เป็นค่าจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดที่แนวนั้นตัดผ่านเป็นตัวระบุ เช่น ทิศทาง $[111]$ มีจุดจำนวนนับไม่ถ้วนที่ทิศทางนี้ตัดผ่าน เช่น จุด $0,0,0$ จุด $1,1,1$ นอกจากนี้ยังผ่านจุด $2,2,2$ และ $1/2,1/2,1/2$ และจุดอื่นๆอีกนับไม่ถ้วน

ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย "-" หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบ จะใช้อักษร $(h \ k \ l)$ (ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย "," คั่น)

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน $x \ y \ z$ ที่จุด $1/0, 1/1, 1/0$ หรือ จุด $\infty, 1, \infty$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



(Kittel, page 13)

รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆ ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำารเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

ระนาบ	ดัชนีมิลเลอร์ h k l	ระยะตัดแกนผลึก x, y, z	ส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ 1/h 1/k 1/l
(010)	0, 1, 0	$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{0} \frac{1}{1} \frac{1}{\infty}$ $0 \ 1 \ 0$
($\bar{1}11$)	-1, 1, 1	-1, 1, 1	$\frac{1}{-1} \frac{1}{1} \frac{1}{1}$ $-1 \ 1 \ 1$
($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)	-1, -1, -1	-1, -1, -1	$\frac{1}{-1} \frac{1}{-1} \frac{1}{-1}$ $-1 \ -1 \ -1$
(224)	2, 2, 4	0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{4}$ $2 \ 2 \ 4$
(220)	2, 2, 0	0.5, 0.5, ∞	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{\infty}$ $2 \ 2 \ 0$

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

- สำหรับระบบเฮกซะโกนอลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hki) โดยมีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่ 3 (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนี 2 ตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

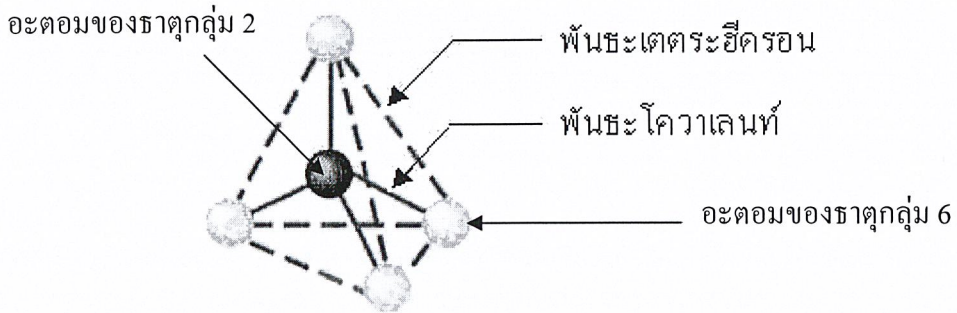
เช่น ระนาบ(110) จะเรียกว่า (1120) ในระบบเฮกซะโกนอล

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

2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างแถบพลังงานของสาร ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายโครงสร้างผลึกของเพชร ซึ่งมีพันธะเคมีของโมเลกุลแบบพันธะเตตระฮีดรอน ดังรูปที่ 2.3

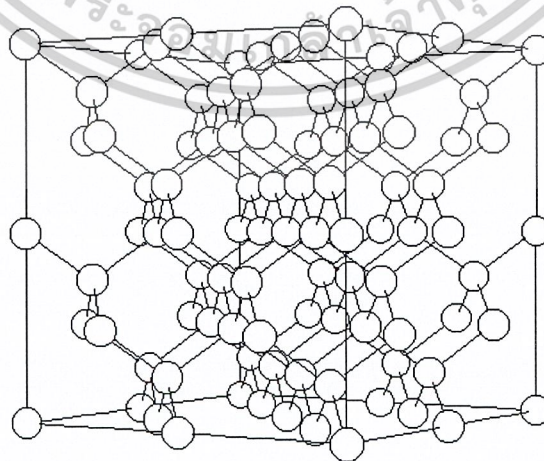
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงพันธะเตตระอีตรอนของสารประกอบของอะตอมของธาตุกลุ่ม 2-6

2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ α -Sn อาจพิจารณาได้ว่า โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattice: fcc, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) สองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง ของเส้นทะแยงมุมโดยหนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอม และอะตอมของโครงสร้างผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันอยู่ที่ตำแหน่ง 000 , $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$, $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$, $\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวไปได้ยาก โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

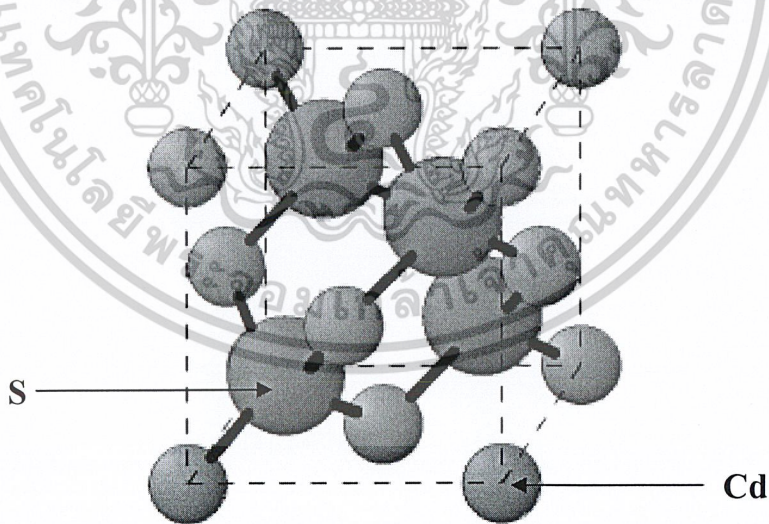


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ 2 ชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่(binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe และ ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์ คิวบิก 2 โครงสร้างซ้อนกันอยู่แต่โครงสร้างหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงสร้างเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI(หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่นใน ZnS อะตอมของ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}$ และ $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$ ส่วนตำแหน่งของอะตอม S จะอยู่ที่ $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}$ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

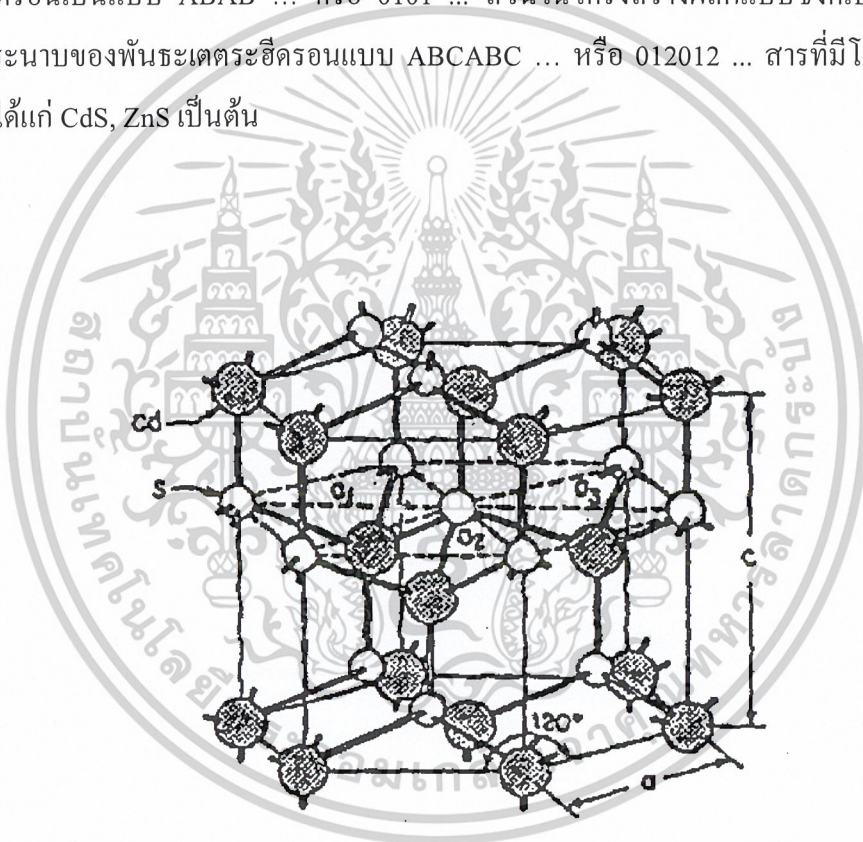


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

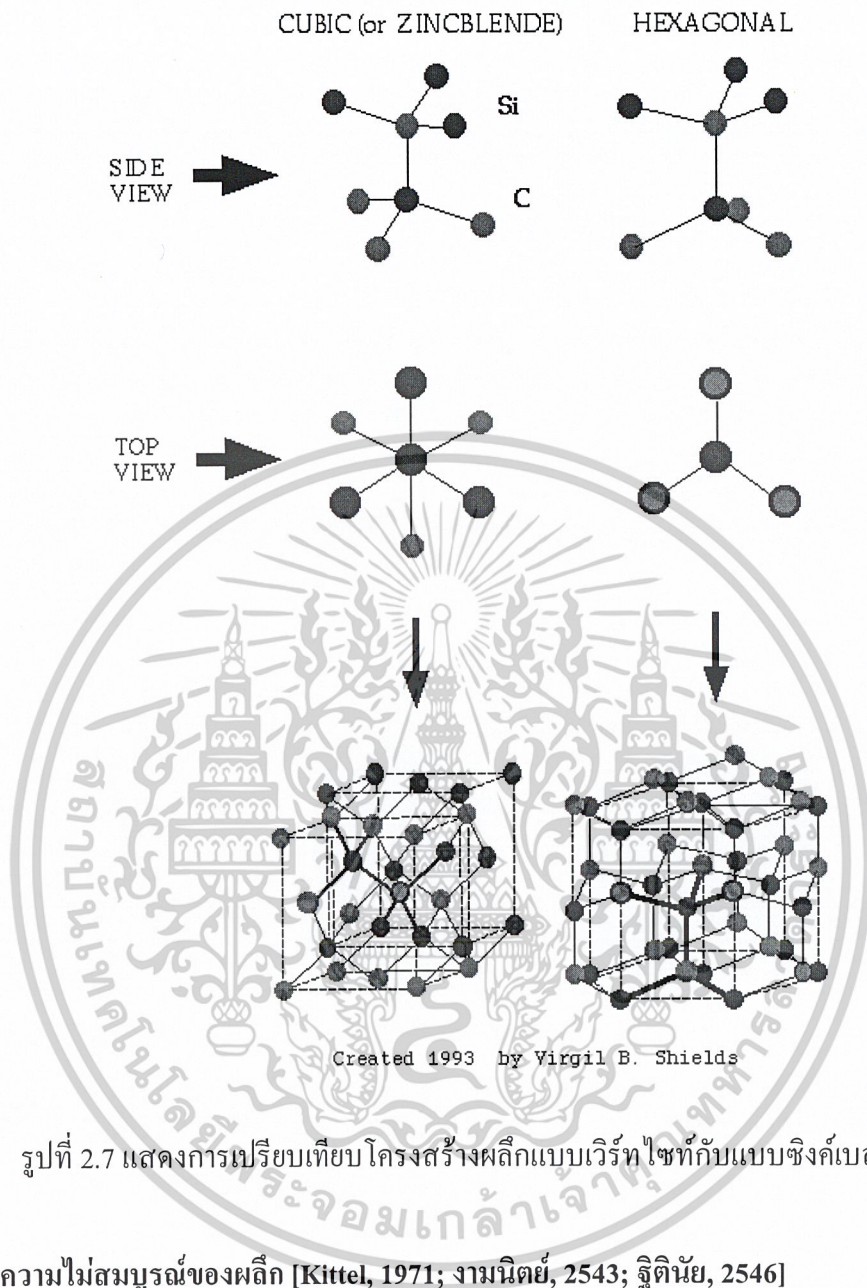
2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีอะตอมของธาตุต่าง ๆ อยู่ 2 ชนิด วางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB ... หรือ 0101 ... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC ... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ของ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์

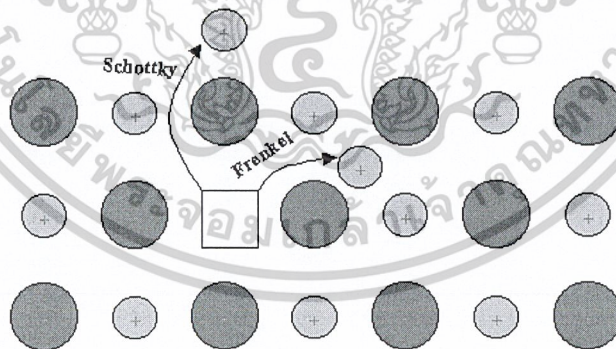
2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก [Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546]

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วย ซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องโครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

2.1.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.8 นี้ จะเกี่ยวข้องกับกาพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

- ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect)
- ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล(interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
- ค) ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนเคิล (frenkel defect) คือ เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไป จากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
- ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

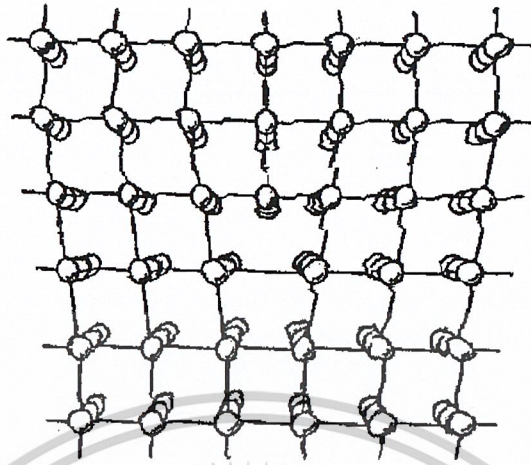


รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

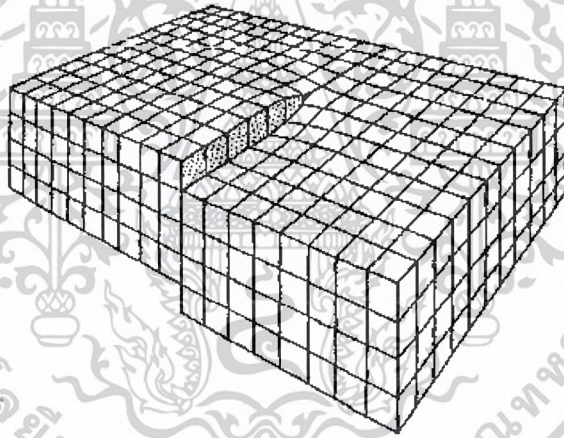
2.1.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน(dislocations) เกิดจากความผิดปกติของจุดของแลตทิซตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) ดังรูปที่ 2.9 และดิสโลเคชันแบบสกรู(screw dislocations) ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

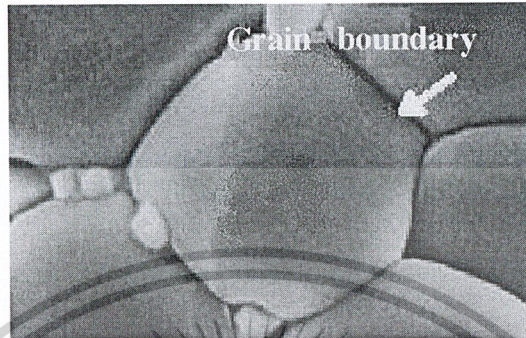
2.1.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ การเรียงระนาบผิดพลาด (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), และเกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรนดังรูปที่ 2.11 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.11 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน

2.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก [Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2546]

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี $\theta-2\theta$ ดิฟแฟร็กโตเมตรี โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

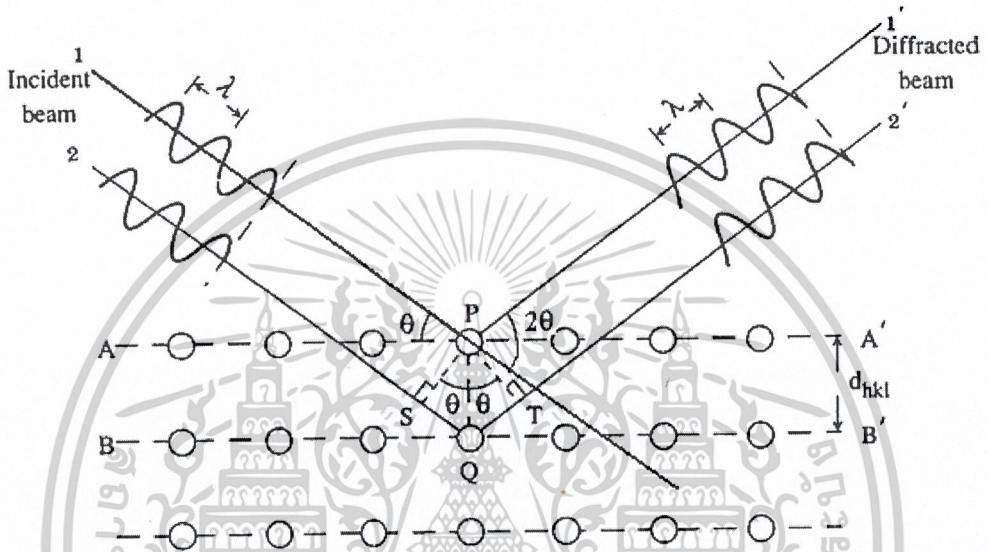
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

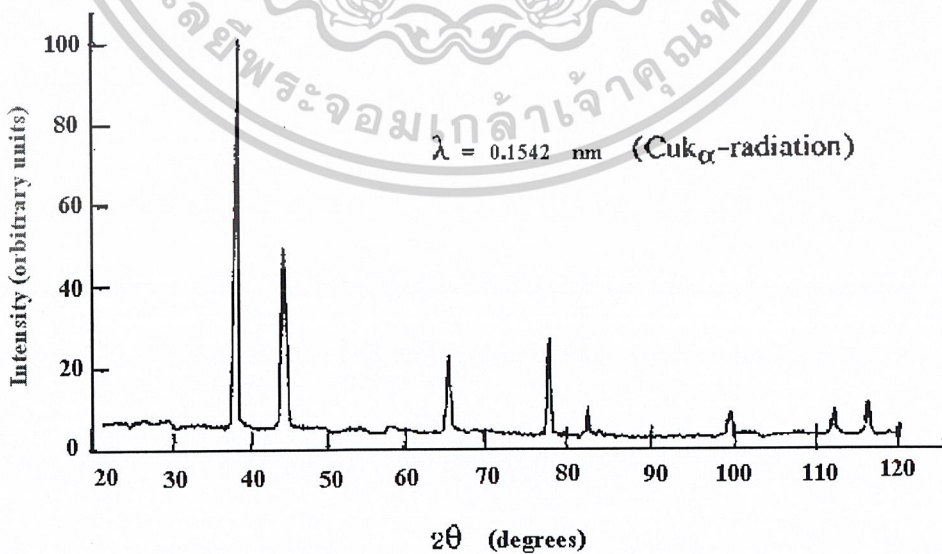
เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
	θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
	λ	คือ	ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากรูปที่ 2.13 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพิก (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ของโครงผลึก(lattice constant)สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ (2.3)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{2.3}$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ (2.4)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \tag{2.4}$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
 h, k, l คือ ระนาบของผลึก
 ขนาดของเกรน (grain size)

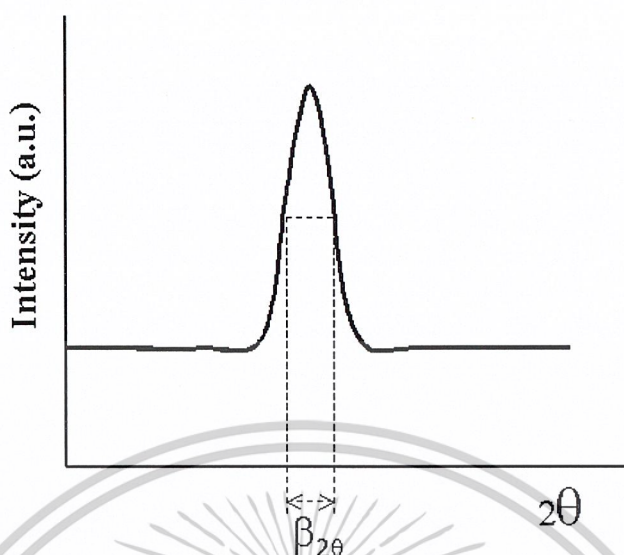
$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \tag{2.5}$$

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

ความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain)

$$\epsilon = \beta_{2\theta} \cos \theta / 4 \tag{2.6}$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียดระดับจุลภาค



รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เราอาจตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก รูปแบบการเลี้ยวเบนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผงผลึก [powder diffraction file (PDF)] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ ซึ่งได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือหรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับใช้ในการอ้างอิง

บัตรข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้ คือ

1. เซตและหมายเลขไฟล์ (set and file number)
2. พิกที่มีความเข้มมากที่สุด 3 ลำดับแรก (three strongest lines)
3. พิกที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (lowest-angle line)
4. สูตรเคมีและชื่อสาร (chemical formula and name of substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนที่ใช้ (data on diffraction method used) เช่น แหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์และฟิลเตอร์ เป็นต้น
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (crystallographic data) เช่น รูปร่างผลึก และขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่น ๆ (optical and other data)
8. ข้อมูลของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ (data of specimen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ (diffraction pattern) จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I_0) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก (hkl)

2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน, ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์, สเปกตรัมการส่งของแสง และการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน [Kittel, 1971; งามนิษฐ์, 2543; จูตินัย, 2546]

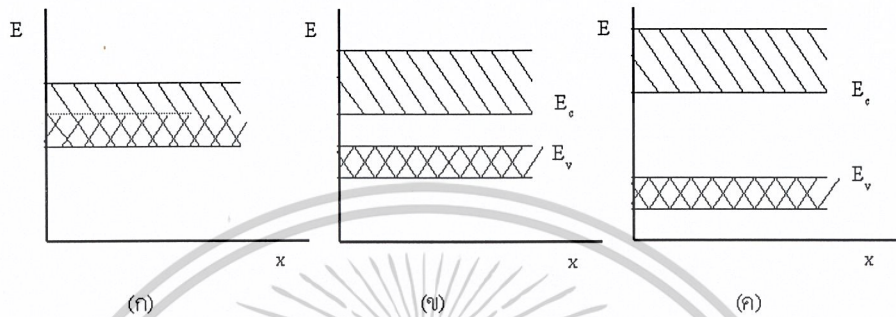
ในโลหะอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า อิเล็กตรอนวาเลนซ์และถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใดโดยเฉพาะ ซึ่งไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระ อิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสอาจถูกเรียกว่าอิเล็กตรอนนำ (conduction electron) และในผลึกของแข็งอาจพิจารณาได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ท่ามกลางบ่อศักย์ที่เป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์ (ion core) มีระยะเท่ากันตลอดซึ่งเท่ากับค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีได้นั้นจะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้น คือ แถบยินยอม (allowed band) และแถบพลังงานที่จะมีได้นี้จะถูกแบ่งกันไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งหมายถึงพลังงานในย่านนี้ อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามหรือช่องว่างแถบพลังงาน” (forbidden band or energy gap) ภายในแถบยินยอมหนึ่งๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนี้จะแสดงตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

2.2.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

ลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของของแข็ง สามารถบ่งบอกคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้น ๆ ได้เป็นอย่างดี สภาพความนำไฟฟ้าของสารใด ๆ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่

กรณีที่จะมีการนำไฟฟ้าได้แล้ว จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์ซึ่งว่างอยู่ในแถบพลังงานและเมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ระดับต่าง ๆ ซึ่งอยู่ได้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ ก็จะได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสถานะที่ว่างอยู่นั้น จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ก็จะเคลื่อนที่ตามกันไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างนี้ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่าง ๆ ภายในแถบพลังงานซึ่งประกอบด้วยแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและวาเลนซ์ซึ่งซ้อนเหลื่อมกัน ซึ่งคือ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.15 (ก)



รูปที่ 2.15 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของ

(ก) โลหะ

(ข) สารกึ่งตัวนำ

(ค) ฉนวน

กรณีของฉนวน แถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นแถบที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และจะแยกจากแถบนำ (conduction band) ซึ่งเป็นแถบที่ว่าง โดยมีช่องว่างแถบพลังงานซึ่งกว้างหลาย ๆ อิเล็กตรอนโวลต์กันอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) และที่อุณหภูมิธรรมดา ๆ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะมีโอกาสน้อยมาก ที่จะมีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำได้ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจึงมีน้อยและจำกัด แต่ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูง ๆ จะทำให้ความนำเพิ่มขึ้นได้

ส่วนสารกึ่งตัวนำความนำไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่างโลหะกับฉนวน และมีโครงสร้างของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.15 (ค) หากแต่ว่าช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดน้อยกว่าฉนวนมาก โดยทั่วไปมักมีค่าไม่กี่อิเล็กตรอนโวลต์ และเนื่องจากว่าช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่าของฉนวนนี้เอง จึงทำให้แม้แต่อุณหภูมิธรรมดาๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ก็สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการนำไฟฟ้าในโลหะกับสารกึ่งตัวนำก็คือ เมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ได้รับพลังงานเพิ่มจากเดิมมากพอที่จะเข้าไปอยู่ในแถบความนำได้แล้วมันจะทิ้งให้เกิดที่ว่างในแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุในแถบวาเลนซ์อีกด้วย ซึ่งกระแสนี้อธิบายได้โดยการกล่าวได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่ของโฮล และยังสามารถสรุปได้ว่าในโลหะพาหะที่ช่วยนำกระแส ไฟฟ้าก็คือ

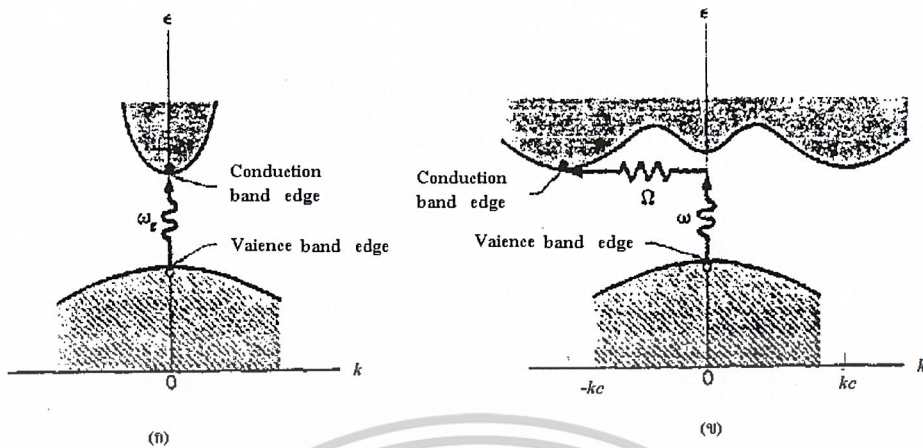
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนอิสระ แต่สำหรับในกรณีสารกึ่งตัวนำ นอกจากอิเล็กตรอนในแถบนำแล้ว ยังมีโฮลในแถบวาเลนซ์ช่วยในการนำไฟฟ้าได้อีกด้วย

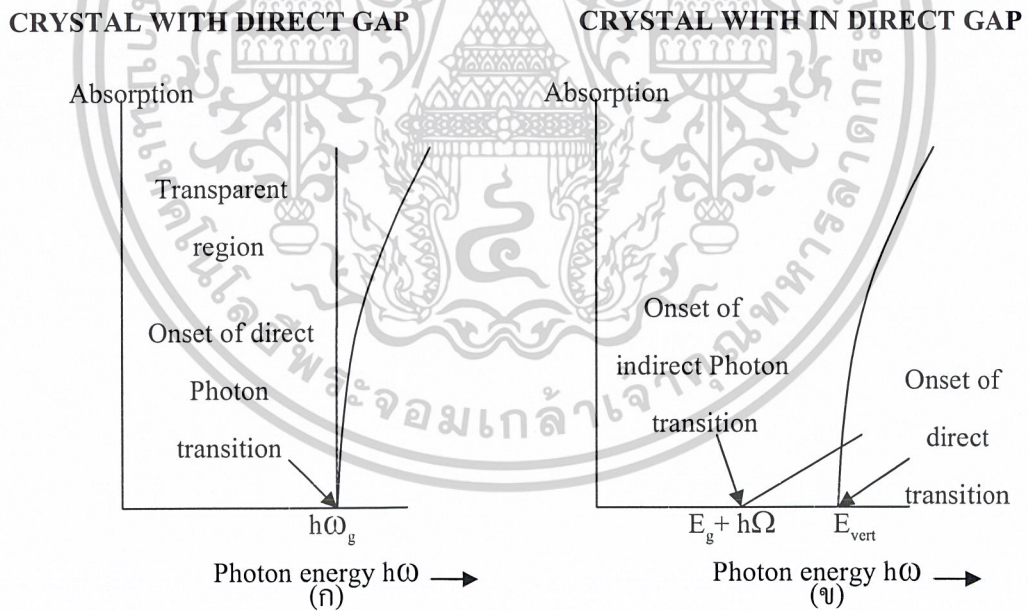
2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบ คือ แบบตรง (direct bandgap) และแบบเฉียง (indirect bandgap) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector; k) ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($h\nu = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.17 (ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้ว จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟตอนเกิดขึ้น $h\nu = E_g \pm \hbar\Omega$ เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระแสดงดัง รูปที่ 2.16 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจนได้กราฟดังรูป 2.17 (ข)



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง



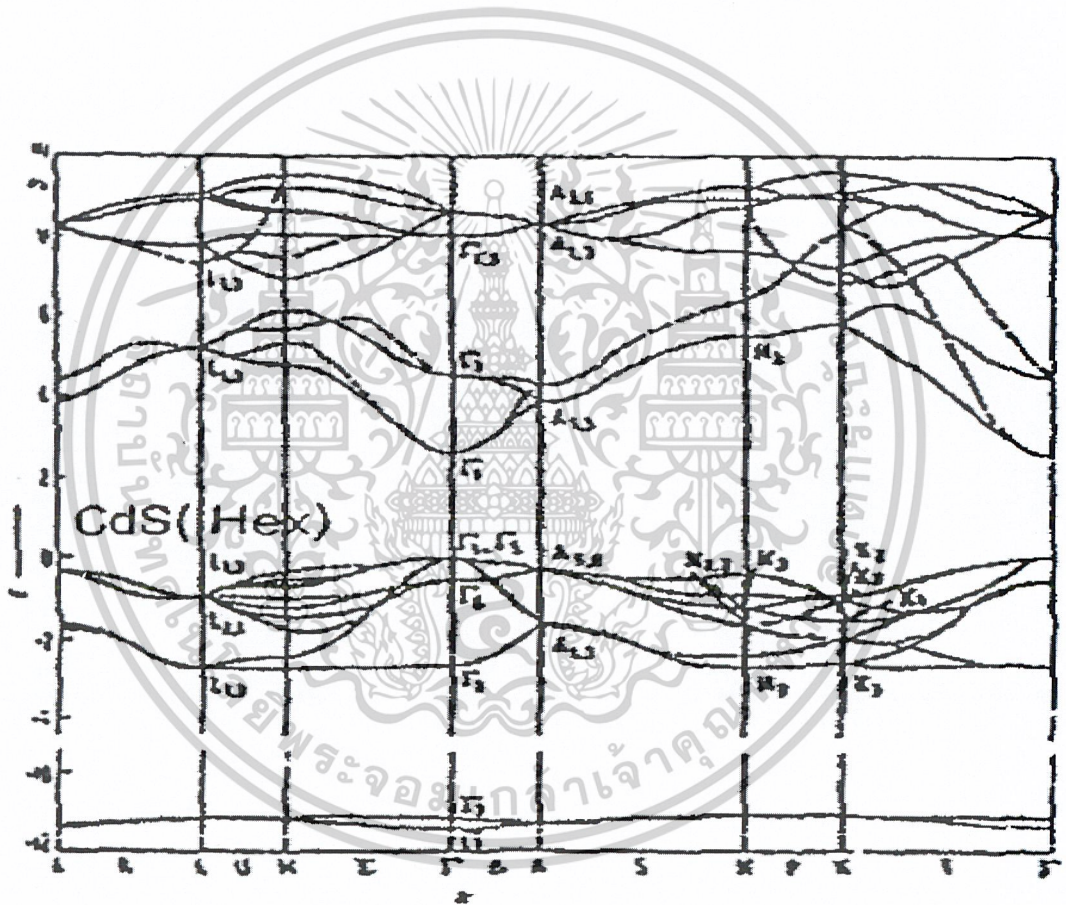
รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

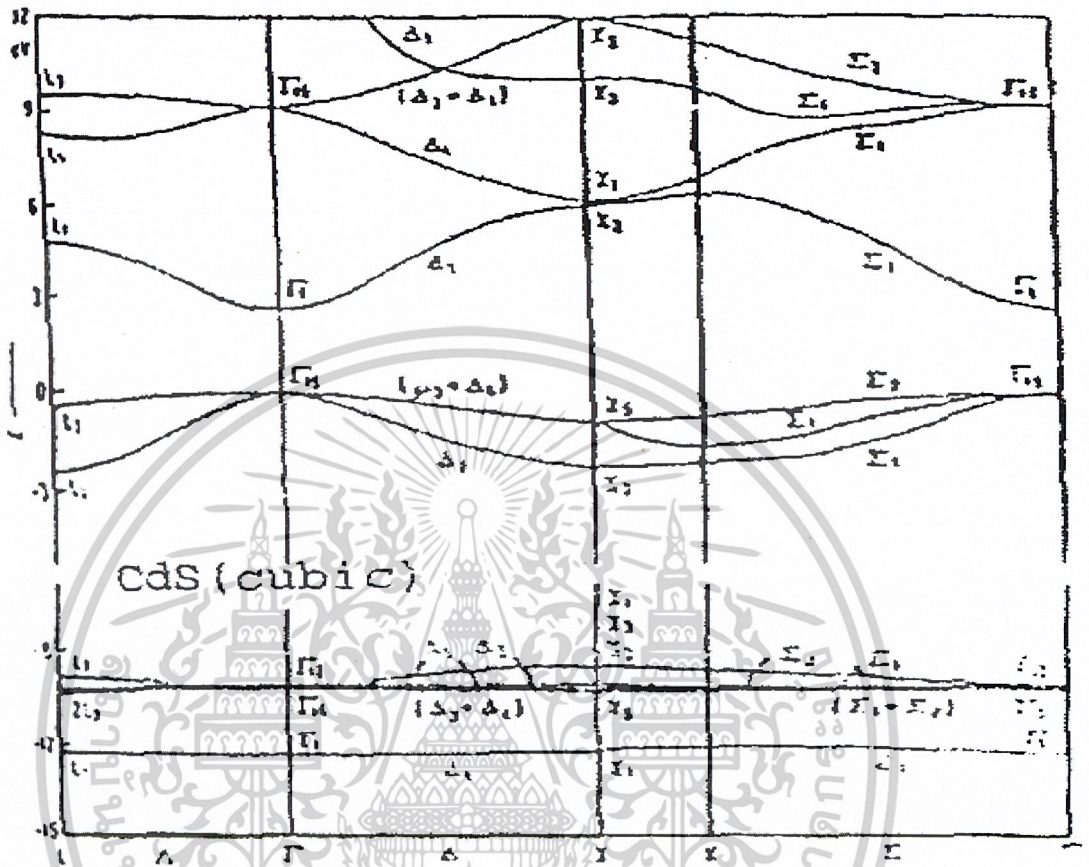
2.2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [สิงหนเดช, 2539]

แคดเมียมซัลไฟด์มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ มีการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน หรือที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และเวิร์ทไซท์ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 โดยที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.5 และ 2.501 อิเล็กตรอน โวลต์ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin-orbit coupling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

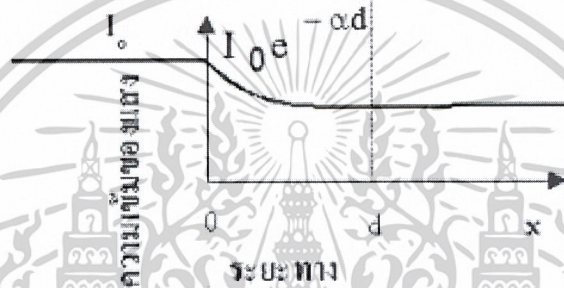
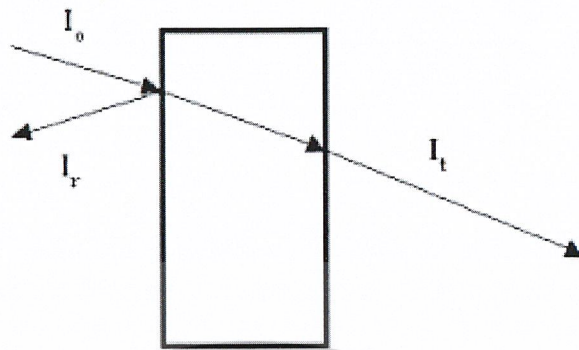


รูปที่ 2.19 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin-orbit coupling)

2.2.3 การส่งผ่านแสง [สิงหเดช, 2539]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง และองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อน
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่าน
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (transmittance)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.8)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.9)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

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

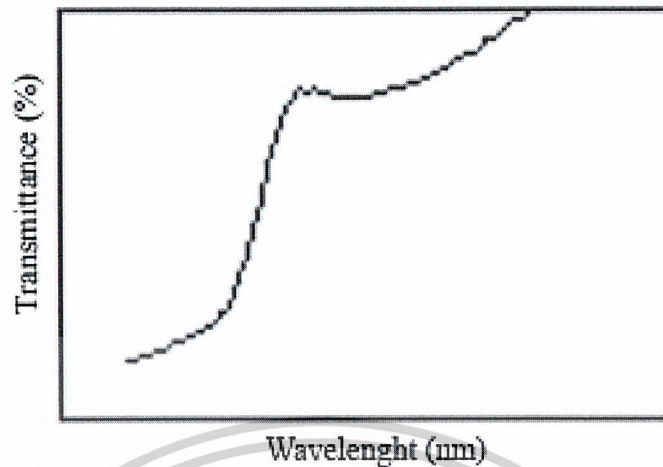
ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.11)$$

2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง [Kittel, 1971; งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; สิงหนเดช, 2539; Abelas, 1972]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสง ที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบ นำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นของ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 พลังงานโฟตอนที่ของการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บ่งชี้จะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง (T) จากรูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T = -\frac{1}{d} \ln \frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I_t} \quad (2.13)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A คือค่าคงที่ และสมการที่ (2.14) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.15)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่ และสมการที่ (2.15) ใช้กับสารที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

2.3 สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้า [Runya, 1975; อารีย์, 2543]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field:E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

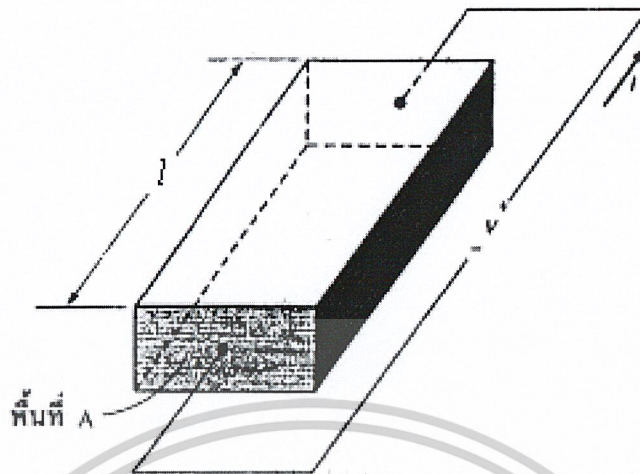
$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p) E \quad (2.16)$$

เมื่อ μ_n, μ_p	คือ	สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ
n	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
p	คือ	ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งให้แรงดันและเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.18)$$

และ

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.19)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.20)$$

หรือ

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

สมการที่ (2.21) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทาน หรือสภาพนำไฟฟ้าและขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [Runya, 1975; อารีย์, 2543]

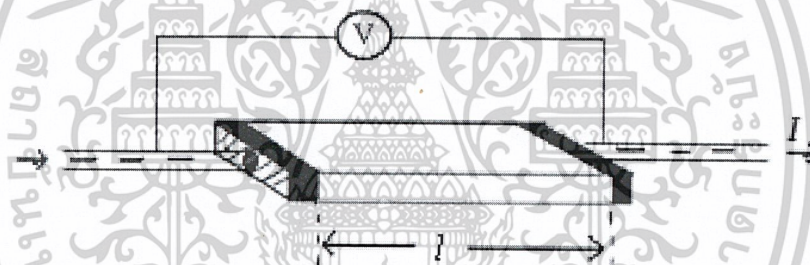
วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารแล้วถึงมาคิดความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารที่ต้องการ การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นถึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่งขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.23

จากค่าที่ทราบ คือ กระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.23 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.22)$$

$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.23)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกหลายองค์ประกอบด้วย

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี แสดงว่าจะต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้า (หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความ

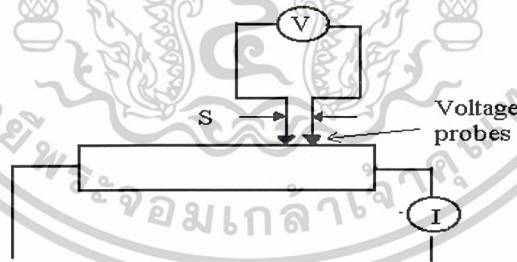
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานจริงๆ ของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทาน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองนี้ใกล้เคียงกันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริงซึ่งหมายถึง ความต้านทานจำเพาะของสารจะมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัส โอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์เพราะที่ผิวสัมผัสจะดี (กรณีเป็นโอห์มมิก) หรือไม่ดี (ไม่เป็นโอห์มมิก) นั้น จะตรวจสอบได้ยากมากจึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูง ๆ (เท่าที่จะหาได้) ถ้าทำเช่นนี้ค่าของความผิดพลาดจะน้อยมาก

2.3.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.24 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.24 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้งในการวัดทุกครั้ง จะต้องให้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่กำลังจะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการเอกสารถนเป็นเอกสารถสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้า – ออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ โครงสร้างผลึกว่ามีโครงสร้างผลึกชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

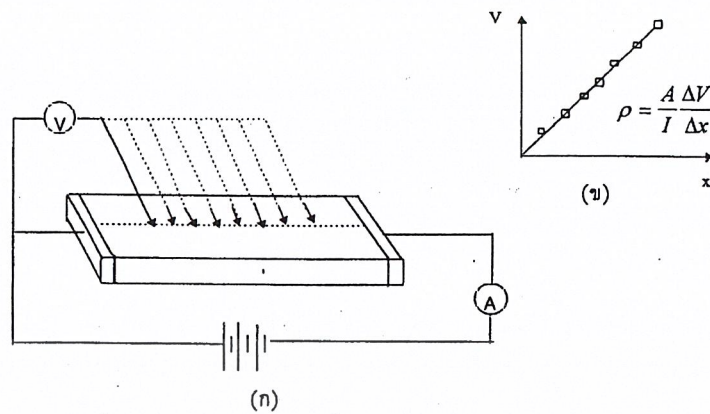
สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้ว

- วัดศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบนสารตัวอย่างนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทังสเตน เงิน พลาตินัม เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่าง จะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่าง ว่ากำลังวัดอยู่ในระนาบหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องมีความสมบูรณ์ไม่เกิดขอบเขตของเกรน(grain boundaries) ที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลายๆ จุด และต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะสั้น ๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไปด้วยวิธีดึงที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.25 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

(ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเคลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเคลื่อนขั้วไฟฟ้า

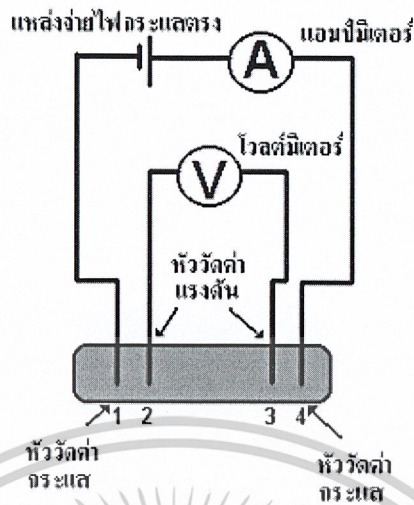
2.3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

เป็นวิธีที่ใช้วัดความต้านทานทางไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม วิธีการนี้ได้ใช้กันมานาน 70 กว่าปีมาแล้ว ซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้อยู่เป็นวิธีที่ดีและไม่ได้ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วปัญหาของสองจุดและสี่จุดคล้าย ๆ กัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่าง ๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วในแนวเส้นตรงนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าด้านในให้กระแสออกตลอดจนที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่าง เป็นโลหะแข็งโดยทั่วไปจะใช้เป็นเส้นลวดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไปไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ พอมจะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์ที่จริง ๆ แล้ว จะใช้การหาศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการของปัวซอง (poisson's equation) ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาจากสูตรคำนวณหาความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้ว จะหาได้จากกระแสที่เข้าไปสารตัวอย่างและวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการตีกระแสจะต้องให้มีลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาการวัดความต้านทานจำเพาะด้วยวิธีใช้หลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้นสูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อมีความเหมาะสมดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่สองข้อคือ

1. ขั้วทั้งสองจะต้องมีลักษณะแหลมมีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสผิวสารตัวอย่างเท่า ๆ กันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย
2. สารตัวอย่างตรงบริเวณที่ขั้วทั้งสองวางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกรวงด้านในและจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (semi sphere) โดยอาศัยหลักการไฟฟ้าสถิตย์ เมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่าง จะสามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะ r ใด ๆ ได้

$$V = \frac{K}{r} \quad (2.24)$$

เมื่อ r คือ ระยะใด ๆ ที่จะหาศักย์เทียบกับจุดที่ให้กระแส

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของกระแสที่ฉีดเข้าไป และรูปร่างของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในได้จาก

$$E = -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = \frac{K}{r^2} \quad (2.25)$$

เนื่องจากขั้วทั้งสองไม่อยู่ห่างกันมาก ดังนั้นจึงคิดได้ว่าการไหลของกระแสจะมีค่าสม่ำเสมอจาก ความสัมพันธ์เบื้องต้นจะได้ความหนาแน่นของกระแส J คือ

$$J = qn\mu E \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยคิดว่า $(\partial n / \partial r) = 0$ หมายความว่า ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการแพร่ น้อยมากและสม่ำเสมอที่ระยะ r โดยกำหนด n คือ ความหนาแน่นของพาหะ μ คือ สภาพคล่องของพาหะ และ q คือ ประจุไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.26) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสภาพต้านทานไฟฟ้าจะได้

$$J = (E / \rho) \quad (2.27)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น การกระจายของกระแสเป็นลักษณะครึ่งทรงกลม ดังนั้นจะหากระแส I รวมทั้งหมด คือ

$$I = J * A = (E / \rho) * 2\pi r^2 \quad (2.28)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของครึ่งทรงกลม รัศมี r
นำสมการที่ (2.25) แทนในสมการที่ (2.28) จะได้ค่าคงที่ K คือ

$$K = \left(\frac{I\rho}{2\pi} \right) \quad (2.29)$$

และนำค่าคงที่ k นี้แทนในสมการที่ (2.24) จะได้รูปทั่วไป

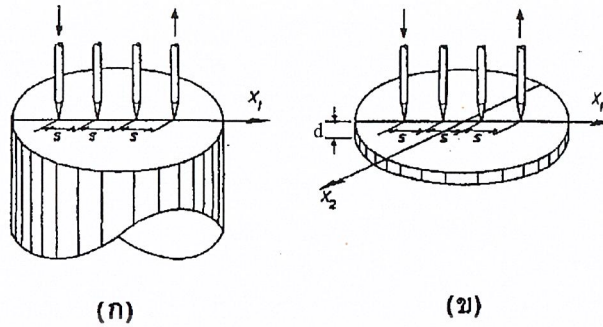
$$V = (\rho I / 2\pi r) \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.30) เป็นสมการพื้นฐานสำหรับใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าชนิดสี่ขั้วที่คิดว่าสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่และหนามาก ส่วนถ้านำมาใช้เป็นสารตัวอย่างที่มีขนาดบาง d จะได้สมการที่แก้ไขแล้วดังนี้

$$V = (\rho I \ln 2 / \pi d) \quad (2.31)$$

สรุปการนำสมการที่ (2.30) และ (2.31) ไปใช้งานให้พิจารณาความหนาของสารตัวอย่างดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.27 (ก) และ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่วางเรียงในแนวเส้นตรง

(ก) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความหนา มาก

(ข) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความยาวเพียง d

ข้อแนะนำ

ในการทดลองควรจะให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างที่ต้องการวัดให้น้อยที่สุด ควรจะไม่เกิน $2\pi s$ มิลลิแอมแปร์หรือน้อยกว่านี้ วิธีการสร้างเครื่องมือชนิดนี้ควรจะให้ระยะ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์มีค่า 0.195 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้เทอม $2\pi s$ มีค่าเป็น 1 ดังนั้นค่า V/I ที่วัดได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะโดยตรงในหน่วยของ โอห์ม-เซนติเมตร ถ้านำไปวัดบนสาร ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กก็จะไม่สามารถจัดขั้วไฟฟ้าได้ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ต้องใช้หลักการทั่วไป

จะเห็นได้ว่าการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะชนิดสี่ขั้วเชิงเส้น มักจะใช้วัดบนสาร ตัวอย่างในลักษณะต่าง ๆ แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่คือ

1. สารตัวอย่างมีรูปร่างทรงกระบอกตัน เช่น ผลึกที่ได้จากการปลูก โดยวิธีดึงขึ้นใน แนวตั้ง
2. บนผลึกที่เป็นแผ่นบาง ๆ ซึ่งได้จากการตัดเป็นแผ่นเรียบรื้อแล้ว
3. บนผลึกที่มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนา

2.3.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ [Garadkar, 1999; Ramaiah, 1999; Garcia, 1987; Gunal, 1997]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น มีที่โดดเด่นอยู่ในแต่ละ ช่วงอุณหภูมิ 2 แบบด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นใน บริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือไม่ก็เกิดการขยายตัวของ เขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกับดัก ประจุ, ระดับพลังงานของสารเจือ, ขนาดของเกรนและความยาวเดออร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{-1}{2}} \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.32)$$

เมื่อ	Φ_b	คือ	ค่าค่าแกงศักย์
	A	คือ	ค่าคงที่
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน
	K	คือ	ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์ (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} J/k

และในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกรนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบการนำไฟฟ้าแบบนี้โดดเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพบพหุนั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกับดักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{-1/4}\right] \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทคโนโลยีสุญญากาศและเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ [Ohring, 2002; McGuire, 1988; Harris, 1989; ชัยวิทย์, 2526]

2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซในอุดมคติ (kinetic theory of gases)

ทฤษฎีจลน์ของก๊าซเป็นทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายตัวแปรในระดับมหภาคของก๊าซ เช่น ความดัน ด้วยค่าเฉลี่ยของสมบัติของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซ โดยอาศัยหลักทางกลศาสตร์และสถิติเป็นพื้นฐานในการคำนวณ

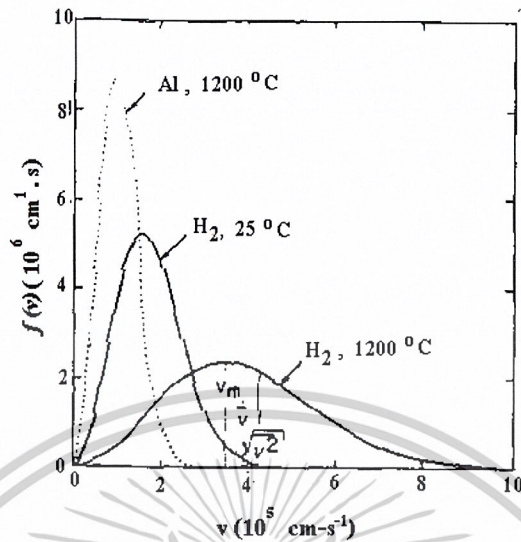
2.4.1.1 การกระจายความเร็วของโมเลกุล (molecular velocities)

ความเร็วของแต่ละโมเลกุลของก๊าซ จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลหรือระหว่างโมเลกุลกับผนังภาชนะ จึงเป็นการยากที่จะทราบความเร็วของแต่ละโมเลกุล แต่สมบัติต่าง ๆ ของก๊าซไม่ว่าจะเป็นความดันหรืออุณหภูมิ ต่างก็ขึ้นกับค่าเฉลี่ยความเร็วของโมเลกุลของก๊าซ ดังนั้นเราจึงหันมาหาค่าการกระจายความเร็วโมเลกุลแทนที่จะหาค่าความเร็วของแต่ละโมเลกุลซึ่งเป็นตามฟังก์ชันการกระจายความเร็วของโมเลกุลของแมกเวลล์ ดังรูปที่ 2.28

แมกเวลล์ ได้ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น ในการคำนวณการกระจายความเร็วของโมเลกุล ซึ่งได้เป็นกฎการกระจายความเร็วโมเลกุลดังนี้

$$f(v) = \frac{1}{n} \frac{dn}{dv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{M}{2RT} \right]^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{Mv^2}{2RT}\right) \quad (2.34)$$

เมื่อ	$f(v)$	คือ	ความน่าจะเป็นที่จะพบโมเลกุลที่มีความเร็วอยู่ระหว่าง v กับ $v+dv$
	n	คือ	จำนวนของโมเลกุลต่อปริมาตร
	v	คือ	ความเร็ว (velocity)
	M	คือ	มวลโมเลกุลของก๊าซ
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
	R	คือ	ค่าคงตัวของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อ โมล-เคลวิน



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(v)$ กับ v ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจุดสูงสุดของส่วนโค้ง คือ ตำแหน่งค่าความเร็วที่เป็นไปได้มากที่สุด (most probable velocity) เขียนแทนด้วย v_m โดยสามารถหาค่าได้จาก

$$\frac{df(v)}{dv} = \frac{d}{dv} \left[\frac{1}{n} \left[\frac{dn}{dv} \right] \right] = 0 \quad (2.35)$$

แทนค่าสมการ (2.35) ในสมการ (2.36) จะได้

$$v_m = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (2.36)$$

นอกจากนี้ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในก๊าซไฮโดรเจน การกระจายความเร็วโมเลกุลระหว่างเศษส่วนโมเลกุลที่มีความเร็วต่ำจะมีค่าน้อย ค่า v_m จะเลื่อนไปทางที่ค่า v มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานจลน์โมเลกุลของก๊าซมีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจะพบว่าในก๊าซต่างชนิดกันจะมีการกระจายความเร็วเหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมวลโมเลกุลต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ (M/T) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะเห็นว่าในก๊าซไฮโดรเจน จะมีการกระจายความเร็วแตกต่างกับก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเท่ากัน

สำหรับค่าความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}) , กำลังสองของความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}^2) และความเร็วรากที่สองของค่าเฉลี่ยความเร็วกำลังสอง v_{rms} ซึ่งเป็นค่าความเร็วสูงสุดได้จาก

$$\bar{v} = \int_0^\infty v f(v) dv / \int_0^\infty f(v) dv = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\bar{v})^2 = \int_0^\infty v^2 f(v) dv / \int_0^\infty f(v) dv = \frac{3RT}{M} \quad (2.38)$$

$$v_{rms} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (2.39)$$

2.4.1.2 ความดัน (pressure)

การเคลื่อนที่ชนผนังโดยโมเลกุลก๊าซทำให้เกิดแรงกระทำต่อผนัง ค่าความดันจึงขึ้นกับจำนวนครั้งของการชน, จำนวนโมเลกุล (n), ค่าเฉลี่ยของความเร็วโมเลกุลกำลังสอง $(\bar{v})^2$ และอุณหภูมิ (T) ดังนั้นความดันของก๊าซ (P) จะได้ว่า

$$P = nkT = nRT / N_A = nM\bar{v}^2 / 3N_A \quad (2.40)$$

เมื่อ N_A คือ เลขอาโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.022×10^{23} ต่อโมล หน่วยและมาตราวัดความดันที่ใช้กันโดยทั่วไป

1 บรรยากาศ = 1.013×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร = 1.013×10^5 ปาสกาล

1 ทอร์ = 1 มิลลิเมตรปรอท = 133.3 นิวตันต่อตารางเมตร = 133.3 ปาสกาล

1 บาร์ = 0.987 บรรยากาศ = 750 ทอร์

ค่าเฉลี่ยของระยะทางที่แต่ละโมเลกุลเคลื่อนไปได้โดยไม่ชนกับโมเลกุลอื่น เรียกว่า “ระยะปลอดการชน (mean free path λ_{mfp} ;)” ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของก๊าซที่ขึ้นกับความดัน ในการคำนวณค่า λ_{mfp} เราทราบว่าแต่ละโมเลกุลนั้นมีพื้นที่เป้าหมายเป็น πd_c^2 เมื่อ d_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของระยะการชน ถ้าสมมติว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลหนึ่งเพิ่มขึ้นเป็น $2d_c$ ขณะที่โมเลกุลอื่นๆ ขนาดลดลงเป็นจุดแล้วระยะปลอดการชนที่เคลื่อนไปจะมีรูปแบบเป็นปริมาตรทรงกระบอก คือ $\pi d_c^2 \lambda_{mfp}$ การชนกันของอนุภาคครั้งหนึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไข $\pi d_c^2 \lambda_{mfp} n = 1$ ความถี่ของการชนสำหรับโมเลกุล 1 ตัวในก๊าซ จึงหาได้จาก

$$Z = \pi \sqrt{2} n d_c^2 \bar{v} \quad (2.41)$$

ดังนั้นระยะปลอดการชน (λ_{mfp})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{mfp} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}nd_c^2} \quad (2.42)$$

สำหรับบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ λ_{mfp} จะมีค่าประมาณ 500 อังสตรอม สมมติให้ d_c มีค่าประมาณ 5 อังสตรอม เวลาที่โมเลกุลใช้ในการปะทะกันนั้นสามารถหาได้จาก λ_{mfp}/V และภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวมาจะทำให้เกิดการชนกันประมาณ 10^{10} ครั้งต่อวินาที ดังนั้น λ_{mfp} จะมีค่าเป็น

$$\lambda_{mfp} = 5 \times 10^{-3} / P$$

เมื่อ λ_{mfp} มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและความดัน (P) มีหน่วยเป็นทอร์ ที่ความดัน 10^{-3} ทอร์ λ_{mfp} จะมีขนาดใหญ่ การชนของโมเลกุลจะเกิดที่ผนังของภาชนะสุญญากาศเท่านั้น

2.4.1.3 การชนของก๊าซบนพื้นผิว (gas impingement on surfaces)

ฟลักซ์การชนของก๊าซ (Φ) วัดได้จากความถี่ของโมเลกุลที่ชนพื้นผิวในแนวตั้งฉากต่อพื้นที่ต่อเวลาหาได้จาก

$$\Phi = \frac{1}{4}nv \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.40) จะได้

$$\frac{\Phi}{N_A} = \frac{P}{(2\pi MRT)^{1/2}} \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.44)$$

หรือ

$$\Phi = 3.513 \times 10^{22} \frac{P}{(MT)^{1/2}} \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.45)$$

เมื่อความดัน (P) อยู่ในหน่วยทอร์

ปริมาตรของการไหลต่อวินาที (volume flow per second; v) สามารถหาได้จาก $(\Phi A/n)$ เมื่อคิดเวลาเป็น 1 วินาที จากสมการที่ (2.40) และสมการที่ (2.43) จะได้

$$v = 3.64 \times 10^3 (T/M)^{1/2} A \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การลำเลียงก๊าซและการปั๊ม (gas transport and pumping)

2.4.2.1 ระบบการไหลของก๊าซ (gas flow regimes)

เมื่อเชื่อมต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับปั๊มแล้วทำการดูดก๊าซออก จะทำให้ความดันในภาชนะสุญญากาศเกิดความแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการไหลของก๊าซจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่ปั๊มที่ระดับความเป็นสุญญากาศสูง (high-vacuum) ความหนาแน่นของก๊าซจะมีน้อยจะทำให้เกิดการไหลในระดับโมเลกุล (molecular flow) โดยในการระเหยสารในสุญญากาศ (high-vacuum evaporator) และอุปกรณ์ที่ทำการวิเคราะห์ เช่น เครื่องออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรมิเตอร์ (auger electron spectrometer) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ส่วนทำงานในระบบการไหลในระดับโมเลกุลทั้งสิ้น (molecular-flow regime) หมายความว่าระยะการชนกันของโมเลกุลนั้นกว้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทฤษฎีจลน์ของก๊าซ จะช่วยทำให้มองเห็นภาพการเคลื่อนไหวของโมเลกุลก๊าซอย่างแม่นยำภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวที่ความดันสูงระยะการชนกันของโมเลกุลจะลดลง ทำให้การชนของโมเลกุลนั้นจะเกิดจากการชนกันเองมากกว่าการชนกันที่ผนังของภาชนะ ในกรณีนี้จะเรียกว่าระบบการไหลของก๊าซแบบหนืด (viscous – flow regime)

ข้อแตกต่างของการไหลดูได้จากตัวเลข Knudsen (Kn) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะปลอดการชน (λ_{mfp}) ของก๊าซและลักษณะเฉพาะของระบบ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ หรือ ท่อ (d_p) นั่นคือ $Kn = \lambda_{mfp} / d_p$ จะได้ว่า

$$\text{การไหลในระดับโมเลกุล (molecular flow)} \quad Kn > 1 \quad (2.47 \text{ ก})$$

$$\text{การไหลในระดับกลาง (intermediate flow)} \quad 1 > Kn > 0.01 \quad (2.47 \text{ ข})$$

$$\text{การไหลแบบหนืด (viscous flow)} \quad Kn < 0.01 \quad (2.47 \text{ ค})$$

2.4.2.2 การนำก๊าซ (conductance ; C)

จากรูปที่ 2.29 และ 2.30 ซึ่งแสดงส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศ-ท่อ-ปั๊ม และค่าของสารนำก๊าซในท่อรูปร่างต่าง ๆ เมื่อพิจารณาการไหลของโมเลกุลก๊าซผ่านท่อที่มีพื้นที่ A จากบริเวณที่มีความดัน P_1 ไปยังบริเวณที่มีความดัน P_2 จะได้ว่า

$$Q = C(P_1 - P_2) \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q คือ อัตราขับก๊าซ (gas throughput) มีหน่วยเป็น ความดันคูณปริมาตรต่อวินาที เช่น ทอร์-ลิตรต่อวินาที C เป็นค่าคงที่ของการนำก๊าซมีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาที (liters/s) และเนื่องจาก

$$Q = Pv \quad (2.49)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรของการไหลต่อวินาที คำนึงจากสมการที่ (2.46) จะได้ว่า

$$C = 3.64 (T/M)^{1/2} A \quad \text{หรือ } 11.7 A \text{ ลิตรต่อวินาที}$$

เมื่ออุณหภูมิมีค่าเป็น 298 เคลวิน (25 องศาเซลเซียส)

หากนำท่อมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ค่าการนำก๊าซของระบบ (C_{sys}) จะสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์

$$\frac{1}{C_{\text{sys}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (2.50)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อเชื่อมต่อกันแบบขนาน

$$C_{\text{sys}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (2.51)$$

2.4.2.3 อัตราเร็วของการปั๊ม (pumping speed; S)

การปั๊มเป็นกระบวนการนำเอาโมเลกุลของก๊าซออกจากระบบ ผ่านการทำงานของปั๊ม อัตราเร็วในการปั๊ม (S) คือ ปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านระนาบของท่อต่อหน่วยเวลา เมื่อความดันที่ช่องให้ก๊าซเข้า (pump inlet) มีค่าเป็น P ดังนั้น

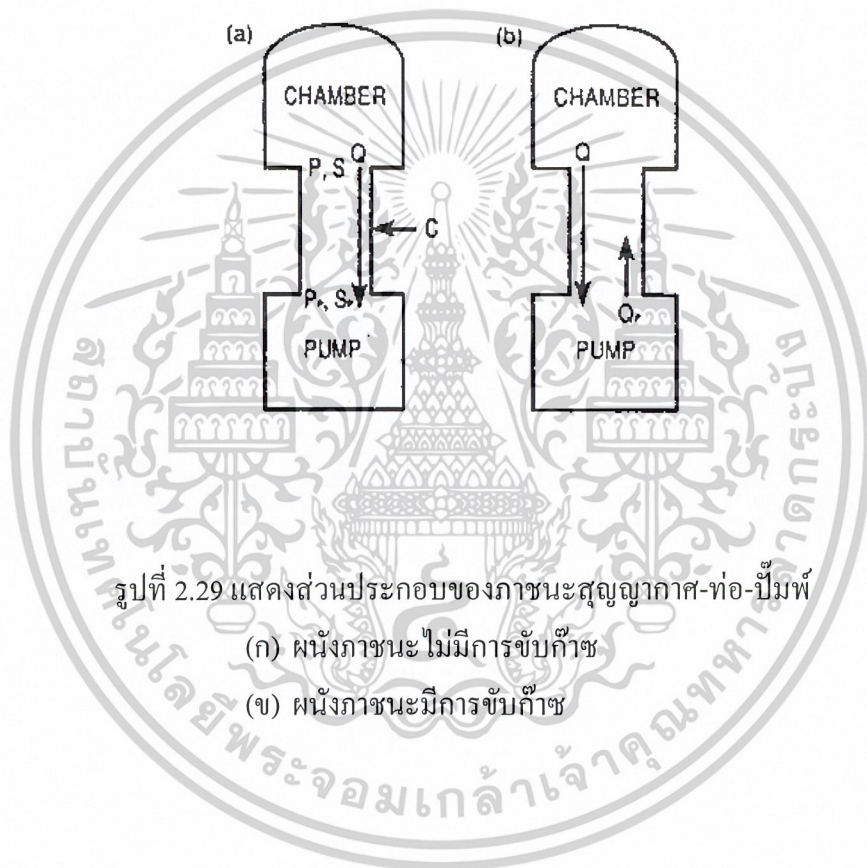
$$S = q/P \quad (2.52)$$

โดยค่าของ q สามารถหาได้จากระนาบใด ๆ ในระบบ P และ S เป็นค่าที่อ้างอิงจากปริมาณที่วัดได้จากท่อของปั๊ม แม้ว่าค่านำก๊าซและอัตราเร็วของปั๊ม จะมีหน่วยเหมือนกัน และบางครั้งอาจจะมีค่าเท่ากัน แต่ก็มีควมหมายในทางกายภาพที่แตกต่างกัน ค่าการนำก๊าซนั้นเป็นตัวบอกถึงส่วนประกอบของรูปร่างท่อจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งมีค่าความดันแตกต่างกัน ส่วนความเร็วในการปั๊มจะอ้างอิงถึงระนาบซึ่งพิจารณาในส่วนของปั๊ม ในการประยุกต์แนวคิดนี้พิจารณาที่นำก๊าซ (C) ที่เชื่อมต่ออยู่กับภาชนะสุญญากาศที่มีความดัน P และปั๊มที่มีความดัน P_p ดังรูปที่ 2.30 จาก $q = C(P - P_p)$ แทนค่า q จากสมการที่ (2.53) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{S_p}{1 + S_p / C} \quad (2.53)$$


โดยที่ S_p คือ ความเร็วในบริเวณช่องให้ก๊าซเข้า และ S คือ ความเร็วของการบีบอัดที่วัดจากสถานะสูญญากาศ ถ้า $C = S_p$ แล้วจะทำให้ความเร็วที่สถานะสูญญากาศจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วบีบอัด

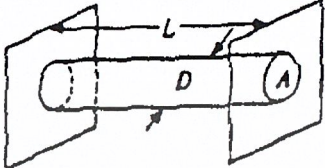


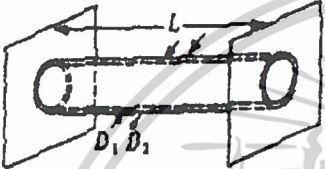
รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของสถานะสูญญากาศ-ท่อ-ปั๊ม


(ก) ผนังภาชนะไม่มีการขับก๊าซ

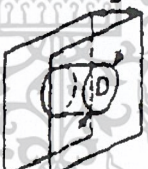
(ข) ผนังภาชนะมีการขับก๊าซ




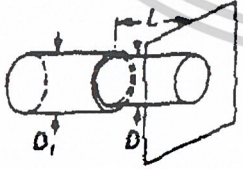
$$C = 3.64A \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} = 11.7A$$


$$C = 6.18 \frac{A^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{DL} = 12.2 \frac{D^3}{L}$$


$$C = 3.81 \frac{D^3 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{L} = 12.2 \frac{(D_2 - D_1)^2 (D_2 + D_1)}{L}$$


$$C = 9.70 \frac{b^2 c^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{(b+c)L} = 31.1 \frac{b^2 c^2}{(b+c)L}$$


$$C = 285D^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{1 + 3L/4D} \right) = 9.14 \frac{D^2}{1 + 3L/4D}$$


$$C = 3.64 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{A}{1 - (A/A_1)} \right) = \frac{11.7A_0}{1 - A_0/A_1}$$


$$C = 3.81 \frac{D^3 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{L} \left(\frac{1}{1 + \frac{4D}{3L} \left(1 - \frac{D^2}{D_1^2} \right)} \right) = \frac{12.2D^3}{L \left[1 + \frac{4D}{3L} \left(1 - \frac{D^2}{D_1^2} \right) \right]}$$

รูปที่ 2.30 ค่าของการนำก๊าซในท่อรูปร่างต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)

ปั๊มสุญญากาศสามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน คือปั๊มแบบเคลื่อนย้ายก๊าซ (gas-transfer pumps) และปั๊มแบบกักเก็บก๊าซ (entrapment pumps) โดยปั๊มแบบเคลื่อนย้ายก๊าซนี้จะนำเอาโมเลกุลของก๊าซออกจากปริมาตรของปั๊ม และนำเข้าสู่ขั้นตอนการอัดให้มีปริมาตรเล็กลงก่อนขับออกไป ส่วนปั๊มแบบกักเก็บก๊าซนั้นจะกักเก็บโมเลกุลของก๊าซเอาไว้ที่ผิวภายในปั๊ม โดยการควบแน่นให้เป็นของเหลว ในที่นี้จะกล่าวถึงปั๊มสุญญากาศแบบเคลื่อนย้ายก๊าซ ซึ่งแบ่งย่อยออกได้อีกสองประเภท คือ

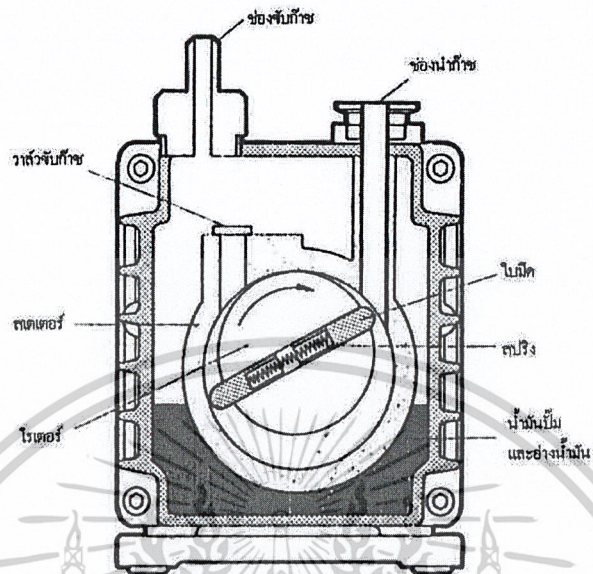
1. ปั๊มที่เคลื่อนย้ายก๊าซโดยการแทนที่ (positive displacement pumps) โดยก๊าซจะถูกแยกออก (isolate) จากช่องนำอากาศเข้า (inlet port) แล้วเคลื่อนเข้าสู่ช่องอากาศออก (outlet port) และจะมีการอัดให้มีปริมาตรของก๊าซเล็กลงก่อนขับออกไป ตัวอย่างของปั๊มประเภทนี้ เช่น ปั๊มกลโรตารี (rotary mechanical pumps)
2. ปั๊มพิกัด (kinetic pumps) โดยปั๊มจะทำงานโดยให้โมเมนตัมแก่โมเลกุลก๊าซในลักษณะที่ทำให้ก๊าซถูกเคลื่อนย้ายจากช่องนำอากาศเข้า ไปยังช่องนำอากาศออกของปั๊มอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของปั๊มประเภทนี้ เช่น ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pumps)

2.4.3.1 ปั๊มกลโรตารี (rotary mechanical pump)

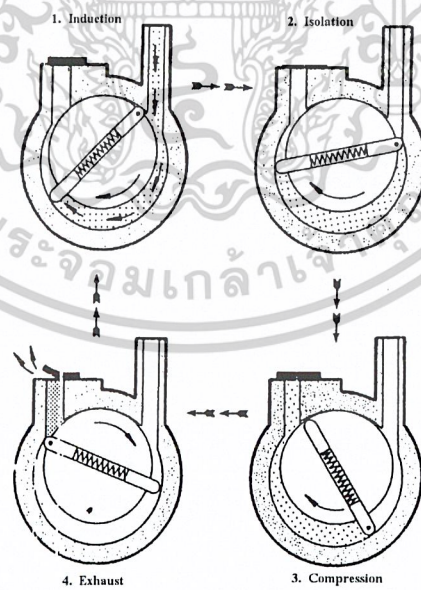
ปั๊มกลเป็นปั๊มที่ใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศได้ประมาณ 10^{-3} ทอร์ แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

2.4.3.1.1 ปั๊มกลโรตารีแบบแวน (rotary vane pumps)

ปั๊มประกอบด้วยภาชนะทำด้วยโลหะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง เรียกว่า สเตเตอร์ (stator) ภายในทรงกระบอกกลวงมีแท่งโลหะรูปทรงกระบอกหมุนได้โดยมอเตอร์ไฟฟ้า เรียกว่า โรเตอร์ (rotor) แกนของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้แต่ละผิวของสเตเตอร์พอดี มีช่องห่างเพียง 0.001 นิ้ว โรเตอร์จะถูกเจาะเป็นร่องเพื่อติดแวน (vane) 2 อัน โดยแวน 2 อันนี้จะถูกดันด้วยสปริงให้แตะกับผิวสเตเตอร์ตลอดเวลา ความเร็วของปั๊มชนิดนี้ (S_p) มีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (หรือ 2.8 ถึง 55 ลิตรต่อวินาที) โครงสร้างของปั๊มแสดงได้ดังรูปที่ 2.31 และรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 แสดง โครงสร้างของโรตารีปั๊มพีชชนิดแวน



รูปที่ 2.32 แสดงจังหวะการทำงาน 4 จังหวะของปั๊มพีชชนิดแวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของปั๊มพัลส์โรตารีชนิดแวน

1. โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา ทำให้ก๊าซถูกดูดออกจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่ปั๊มทางช่องอากาศเข้า เรียกว่า การดูดอากาศเข้า (induction)
2. โรเตอร์จะหมุนต่อไป ทำให้ก๊าซถูกกวนพาให้เคลื่อนที่โดยการแทนที่ (isolation)
3. เมื่อโรเตอร์หมุนไปเกือบ 180 องศา ก๊าซจะถูกอัดจนมีปริมาตรเล็กลง (compression) ทำให้ความดันของก๊าซที่ตำแหน่งนี้เพิ่มขึ้น เหนือกว่าความดันบรรยากาศภายนอก
4. เนื่องจากความดันของก๊าซภายในปั๊มสูงกว่าบรรยากาศภายนอก ดังนั้นก๊าซจะถูกขับออกไป (exhaust) แล้วเริ่มต้นขบวนการแรกอีกครั้งหนึ่งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

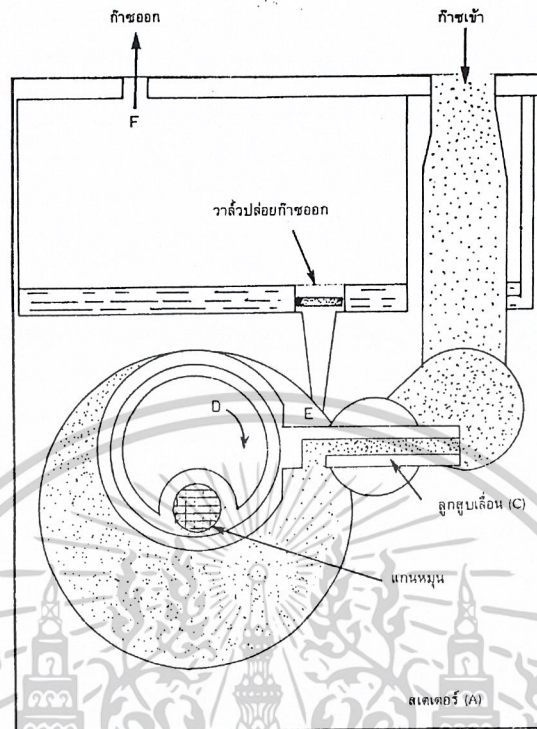
ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

1. ผิวของสเตเตอร์ และโรเตอร์จะต้องสะอาด มันเรียบและที่ซึ่ลด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
2. การซีลระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวซีลหล่อลื่นและระบายความร้อน
3. ก๊าซที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอน้ำของเหลวนี้อาจจะละลายที่ความดันสูงจึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพปั๊มพลดลง วิธีแก้ไขให้ใช้ก๊าซบัลลาสต์ (gas ballast) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป
4. การรั่วของก๊าซที่ถูกอัดที่ซึ่ลตอนบน และซีลระหว่างแวนกับสเตเตอร์

2.4.3.1.2 ปั๊มพัลส์โรตารีแบบลูกสูบ (rotary piston pump)

ปั๊มพัลส์โรตารีแบบลูกสูบจะมีความเร็วในการปั๊มสูงกว่าปั๊มแบบแวน คือ มีค่าความเร็วในการปั๊ม (S_p) ประมาณ 30 ถึง 1500 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (หรือ 8.3 ถึง 416 ลิตรต่อวินาที) ลักษณะภายในของปั๊มแสดงดังรูปที่ 2.33 โดยปั๊มพัลส์โรตารีแบบลูกสูบนี้นี้ ประกอบด้วยสเตเตอร์ (A) ซึ่งมีช่องให้ก๊าซเข้าและช่องขับก๊าซออก แกนเสียบโรตารี (rotary plunger) จะยึดอยู่เหนือแกน B และจะต่อกับวาล์วลูกสูบเลื่อน C ได้ ลูกสูบหรือแกนเสียบประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนถึงกลมภายใน D ต่อกับแกน และกล่องทรงกระบอก E ซึ่งจะมีขนาดพอเหมาะเข้ากับ D เมื่อโรเตอร์หมุนไปเรื่อย ๆ สเตเตอร์จะเกิดการเคลื่อนไหวกลับไปกลับมา ทำให้วาล์ว C เลื่อนเปิดให้ก๊าซไหลเข้ามาอยู่ในสเตเตอร์จะถูกอัดให้ออกทางวาล์ว F

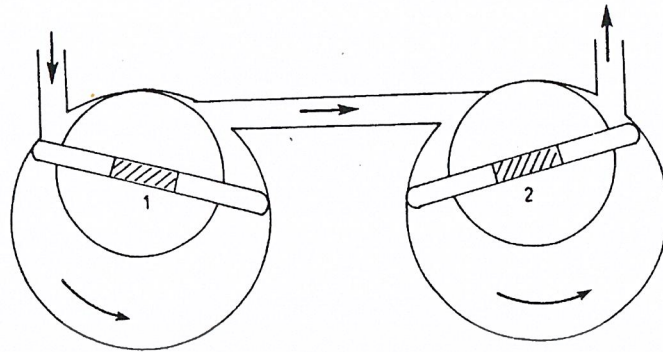
ประสิทธิภาพของปั๊มจะดีถ้าผิวภายในเรียบ สะอาดและใช้น้ำมันเป็นตัวซีลและใช้ก๊าซบัลลาสต์ช่วยในการขับน้ำและไอของเหลวที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำมันออกจากตัวปั๊ม



รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะภายในของปั๊มพอล ไรตารีแบบลูกสูบ

2.4.3.1.3 จังหวะของปั๊ม (stages)

ปั๊มพอลที่มีโรเตอร์ตัวเดียวหมุนอยู่ในสแตเตอร์ เรียกว่า ปั๊มจังหวะเดียว (single stage pumps) จะเห็นว่าก๊าซที่ถูกอัดด้านช่องจับก๊าซ อาจรั่วผ่านซีลกลับเข้าไปด้านความดันต่ำที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศได้อีก จึงไม่อาจใช้ปั๊มนี้อัดความดันได้คืบคั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ปั๊มแบบนี้จะมีสแตเตอร์ 2 ตัวต่อกัน ดังรูปที่ 2.34 และโรเตอร์ 2 ตัว จะหมุนโดยใช้แกนร่วมกัน ก๊าซที่ถูกดึงออกจากภาชนะสุญญากาศ จะถูกอัดให้มีความดันปานกลางโดยใช้จังหวะที่หนึ่ง จากนั้นจังหวะที่สองจะอัดก๊าซให้มีความดันบรรยากาศ เพื่อขับออกจากตัวปั๊ม น้ำ หรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊มในจังหวะแรก จะถูกขจัดออกโดยจังหวะที่สอง ก่อนที่มันจะไหลกลับไปยังจังหวะที่หนึ่ง โดยปั๊มพอล 2 จังหวะนี้สามารถทำสุญญากาศได้ 10^{-4} ทอร์



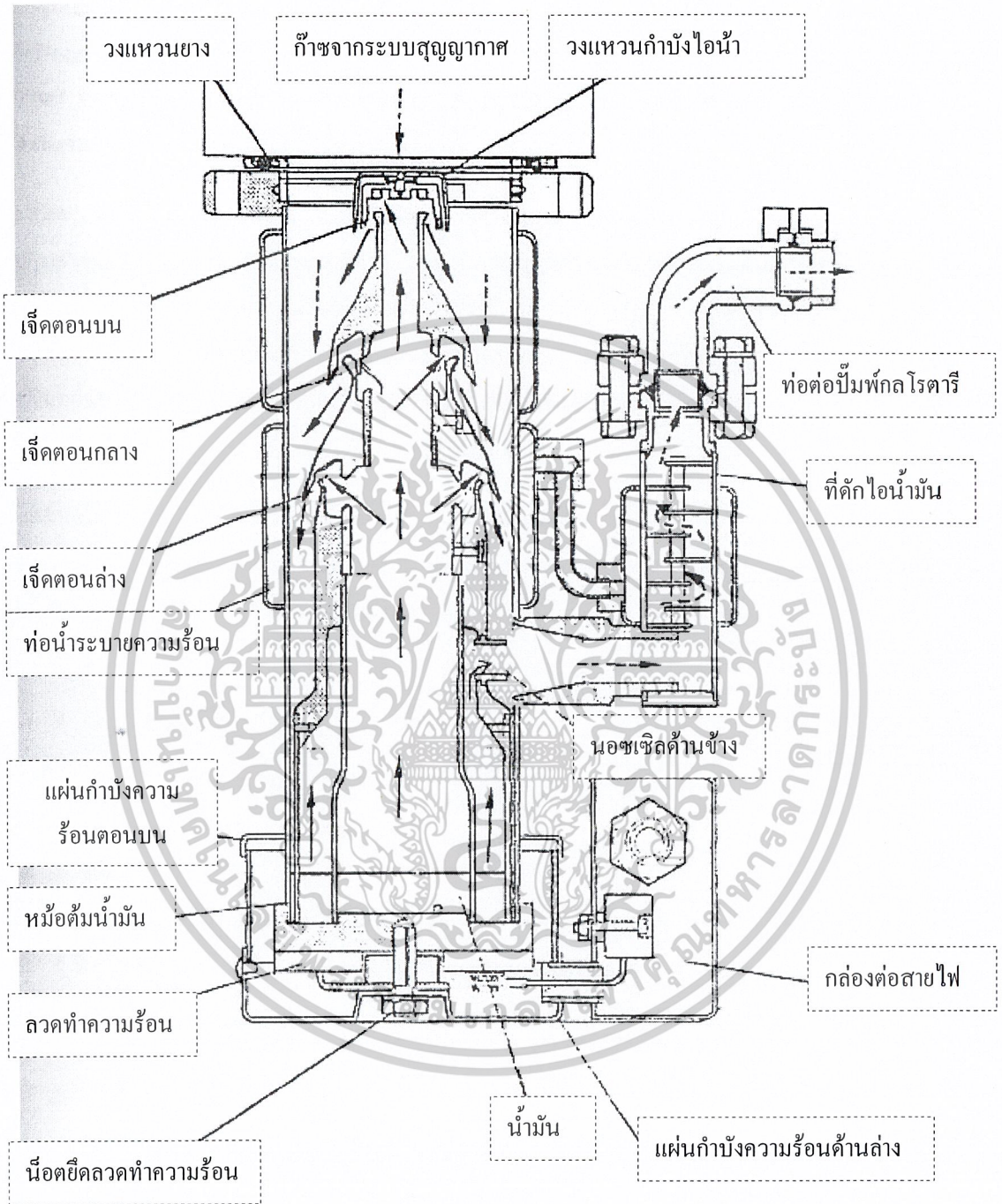
รูปที่ 2.34 ปั๊มพักล 2 จังหวะ (two-stage pumps)

2.4.3.1.4 ก๊าซบัลลาสต์ (gas ballast)

ก๊าซบัลลาสต์ คือ วิธีการขจัดไอน้ำหรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊ม โดยการเพิ่มความดันก๊าซรวมให้สูงกว่าความดันไอลอยของน้ำหรือไอของของเหลว ซึ่งทำได้โดยเปิดวาล์วให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในส่วนของสเตเตอร์ที่เป็นช่วงอัดของปั๊ม อากาศจะผสมกับไอของของเหลวที่กำลังถูกอัดจะมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความดันย่อยของของเหลวจะลดลงเมื่อความดันย่อยลดลง ไอของของเหลวจะไม่ควบแน่นในน้ำมัน แต่จะถูกขับออกไปพร้อมกับก๊าซและอากาศ

2.4.3.2 ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pumps)

เป็นปั๊มสุญญากาศสูงสามารถสร้างสุญญากาศได้ถึงระดับ 10^{-10} ทอร์ ปั๊มไอฟุ้งกระจายนี้ จะเริ่มทำงานได้ที่ระดับความดันประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} ทอร์ ดังนั้นจึงนิยมใช้ปั๊มพักลโรตารีทำงานควบคู่กันไปด้วย หลักการทำงานของปั๊มชนิดนี้ คือ น้ำมันซึ่งอยู่ที่ก้นท่อเหล็กรูปทรงกระบอก จะถูกเผาให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าจนเดือด น้ำมันหรือปรอทจะระเหยกกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องกลวง ดังรูปที่ 2.35 ไอน้ำมันจะปะทะกับช่องเจ็ตที่ระดับต่าง ๆ กัน ถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ประกอบกับส่วนบนของท่อทรงกระบอกจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อไอน้ำสูญเสียพลังงานความร้อนทำให้พลังงานจลน์ลดลงมันจะตกลงมา เกิดการปะทะกับโมเลกุลของก๊าซที่ผิวตอนบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง เสมือนว่าหยดไอน้ำมันปริมาณมาก กวาดโมเลกุลของก๊าซลงมาเป็นจังหวะพร้อม ๆ กัน โมเลกุลของก๊าซที่มาออกอยู่ด้านล่าง จะทำให้ความดันของก๊าซส่วนล่างมากกว่าส่วนบน และปั๊มพักลโรตารีจะดึงออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย



รูปที่ 2.35 ส่วนประกอบภายในของปั๊มพ่นไอพู่กระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.35 เป็นปั๊มฟิวส์กระจายที่มีช่องเจ็ต 3 ชั้น (3 stages) ด้านบนต่อกับระบบสุญญากาศโดยมีวงแหวน (guard ring) กำบังไม่ให้ไอน้ำมันเคลื่อนเข้าสู่ระบบสุญญากาศเกิดปรากฏการณ์ไหลย้อนกลับ (back streaming) จึงต้องมีแผ่นตะแกรง (baffle) คอยดักไอน้ำมันเอาไว้ ถ้าจะถูกปั๊มฟิวส์ออกทางข้อต่อท้าย (backing connection) กับปั๊มฟัลกลโรตารี

2.4.4 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร (thin-film evaporation processes) [Ohring, 2002]

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร จะทำกันในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังแผ่นรองรับ (substrate) ที่ห่างออกไป แล้วทับถมกันเกิดเป็นฟิล์มบาง วิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสารนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation)

2.4.4.1 อัตรการระเหยสาร (the physics and chemistry of evaporation) [Ohring, 2002]

จากการทดลองของเฮิร์ตและนูดเซน (Hertz and Knudsen) อัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.54)$$

โดยที่ Φ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เมื่อ P_e มีหน่วยเป็นทอร์ อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.55)$$

โดยที่ Γ_e คือ มวลของอัตราการระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ค่าของ Γ_c ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะจะมีผลกระทบมากต่อความดันสมดุล

2.4.4.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements) [Ohring, 2002]

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.56)$$

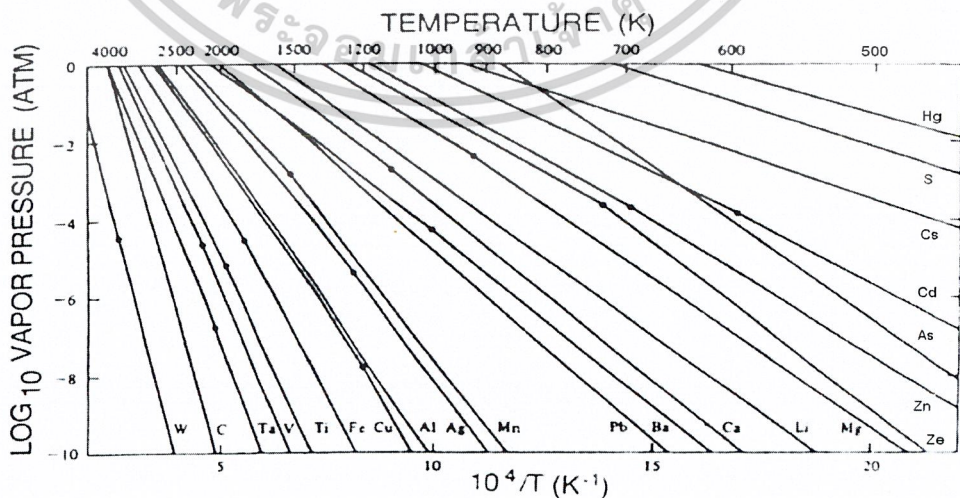
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.56) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.57)$$

จากการประมาณค่า $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_c (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้จะได้

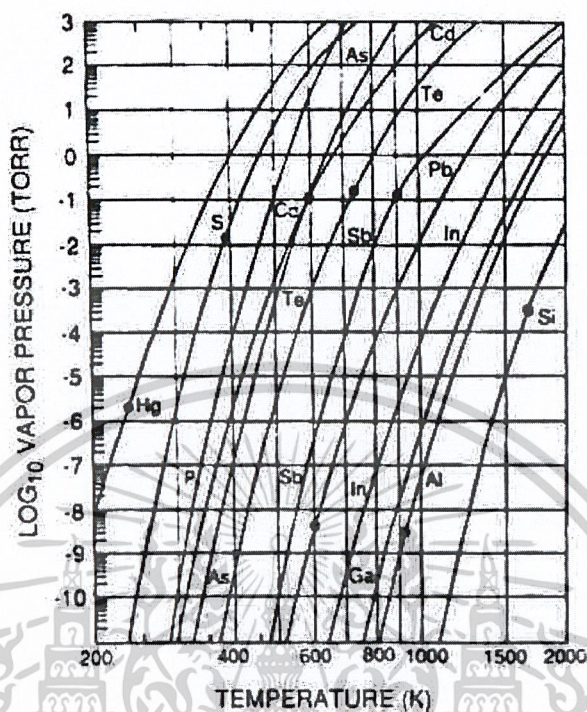
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.58)$$

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



รูปที่ 2.36 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ จุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.4.4.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า (electrically heated evaporation source) [Ohring, 2002; McGuire, 1988; Harris, 1989]

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบผิวแผ่นรองรับ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิด โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทาน หรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด ดังรูปที่ 2.36 และรูปที่ 2.37 แบ่งออกได้ดังนี้

2.4.4.3.1 แหล่งกำเนิดชนิดลวดทังสเตน (tungsten wire source) [Ohring, 2002; McGuire, 1988; Harris, 1989]

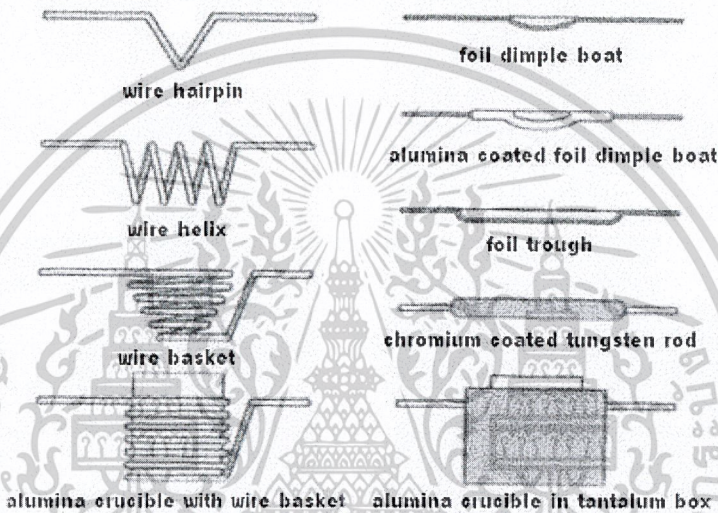
แหล่งกำเนิดชนิดนี้จะอยู่ในรูปของขดลวดพันรอบเดี่ยวหรือพันหลายรอบ เป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดเกลียวทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทังสเตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป (refractory metal sheet source) [Ohring, 2002]

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทังสเตน, แทนทาลัม และโมลิบดีนัม จะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวด คือ มีความต้านทานในตัวเอง และให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมารูปปร่างต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 2.38

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.38 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

2.4.4.3.3 เตาระเหิด (sublimation furnaces) [Ohring, 2002]

ในการระเหย ซัลไฟด์, ซีลีไนด์ และสารประกอบออกไซด์บางชนิด จะต้องใช้เตาระเหิด อุปกรณ์ในการระเหยสารที่เป็นผงหรือผงอัดเม็ด (pellet) จะมีการใช้แผ่นตะแกรง (baffle) เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเด็นหลุดออกมาของอนุภาค เนื่องมาจากการหมุนเวียนของก๊าซที่อัดแน่นภายในแหล่งกำเนิดเพื่อป้องกันอนุภาคไปเกาะติดกับแผ่นรองรับ ซึ่งแผ่นตะแกรงจะยอมให้โมเลกุล หรือ อะตอมของสารเท่านั้นผ่านไป

2.4.4.3.4 เป้าหลอม (crucible source) [Ohring, 2002; McGuire, 1988; Harris, 1989; ชัยวิทย์, 2526]

แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นถ้วยทรงกระบอก ซึ่งสร้างมาจากโบรอน, ไนไตรท, แกรไฟต์, ออกไซด์ และโลหะทนความร้อนสูง เป็นต้น ถ้วยจะได้รับความร้อนจากขดลวดทังสเตนซึ่งล้อมรอบอยู่โดยรอบถ้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (estimating the temperature of resistance heaters) [Ohring, 2002]

ในการออกแบบตัวกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า สำหรับระบบการระเหยสาร การประมาณค่าอุณหภูมิของขดลวดความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ ภายใต้สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า (P) ของแหล่งจ่ายกับอุณหภูมิของขดลวด กำลังไฟฟ้า P มีค่าเป็น $I^2 R$ หรือ V^2 / R โดยที่ I , V และ R คือ กระแส, แรงดัน และความต้านทานไฟฟ้า ตามลำดับ สำหรับขดลวดความยาว L และพื้นที่ตัดขวางเป็น A_c กำลังไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$P = i^2 R = i^2 \rho(0) [T/T(0)]^n L/A_c \quad (2.59)$$

สมการนี้สมมติว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho(T)$ ของโลหะสามารถประมาณได้จากอุณหภูมิ T ดังความสัมพันธ์ $\rho(T) = \rho(0) [T/T(0)]^n$ โดยที่ $\rho(0)$ คือ ค่าของสภาพต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง $T(0)$ และ n คือ ค่าคงที่โดยทั่วไปจะมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือจะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปแล้วทำให้ขดลวดแผ่รังสีความร้อนที่ผิว ในกรณีนี้จะเป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลซ์มาน (Stefan – Boltzmann law) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$P_r = \epsilon \sigma A_s [T^4 - T(0)^4] \quad (2.60)$$

โดยที่	P_r	คือ	กำลังการแผ่รังสี (radiated power)
	ϵ	คือ	ค่าการปล่อยพลังงานรังสีจากผิวหน้า
	σ	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟาน = $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
	A_s	คือ	พื้นที่ผิวของขดลวด

โดยสมการที่ (2.59) และ (2.60) นี้เหมาะสำหรับขดลวดความร้อนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบขด

2.4.4.4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound) [Ohring, 2002]

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อระเหยกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 เช่น สารประกอบของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $\text{MX}_{(s)} \rightarrow \text{M}_{(g)} + \frac{1}{2} \text{X}_{2(g)}$ โดยที่ X เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ S, Se และ Te และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเดิมเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย

ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาเคมี	ตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX (s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX (g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + \frac{1}{2} X_2 (g)$ $MX(s) \rightarrow M(l) + 1/n X_2 (g)$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม 3, 5
การระเหยโดยการแตกตัว (ก) ซาล์โคจีไนต์	$MX(s) \rightarrow M(s) + \frac{1}{2} X_2 (g)$ X = S, Se, Te	CdS, CdSe, CdTe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(s) + \frac{1}{2} O_2 (g)$	SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂

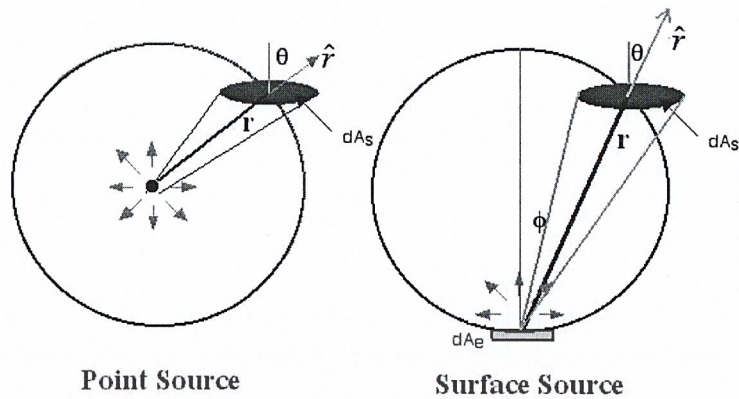
M = โลหะ, X = อโลหะ

2.4.4.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหย (deposition geometry) [Ohring, 2002]

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass, \overline{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\overline{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\overline{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.39 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\overline{M}_s = dA_s \left[\frac{M_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right] \quad (2.62)$$

เมื่อ r คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

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

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

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

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้น

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

จาก $dA_c = dA_s \cos \theta$ จะได้

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\overline{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.63)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\overline{M}_e (n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2}, n \geq 0 \quad (2.64)$$

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

2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

[Schroder, D.K., 1998]

ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในช่วง 1 - 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x y สิ่งสำคัญการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

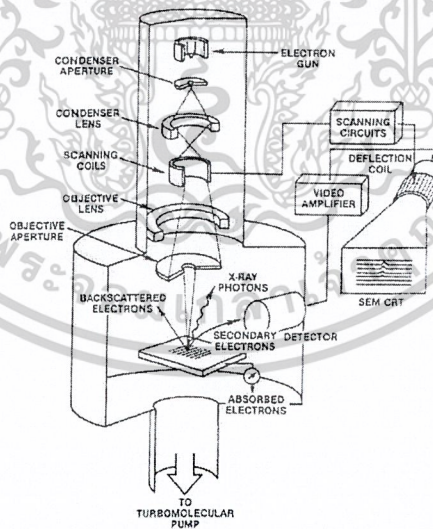
สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงเกินกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมียุทธศาสตร์พลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอสศักดาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกวาดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกวาดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกวาดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกวาดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกวาดด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกวาดสูงจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด



รูปที่ 2.40 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้มีการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ 2 กรณีที่ปลูกโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่อัตราส่วนของ x ค่าต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_xS$) ที่อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ของทั้ง 2 กรณี โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, ศึกษาการส่งผ่านของแสงเพื่อหาลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบาง และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน หาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้นเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางได้ ทำการศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

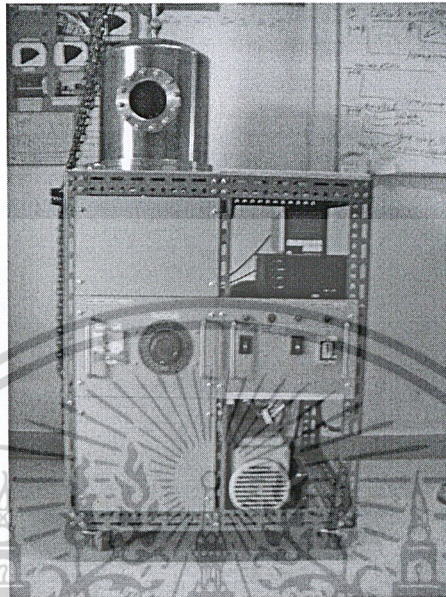
3.1 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ [Ohring, 2002; McGuire, 1988; Harris, 1989; ชัยวิทย์, 2526]

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สิ่งจำเป็นที่สุดก็คือระบบการระเหยสารซึ่งเป็นสุญญากาศ โดยองค์ประกอบของระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศประกอบด้วย

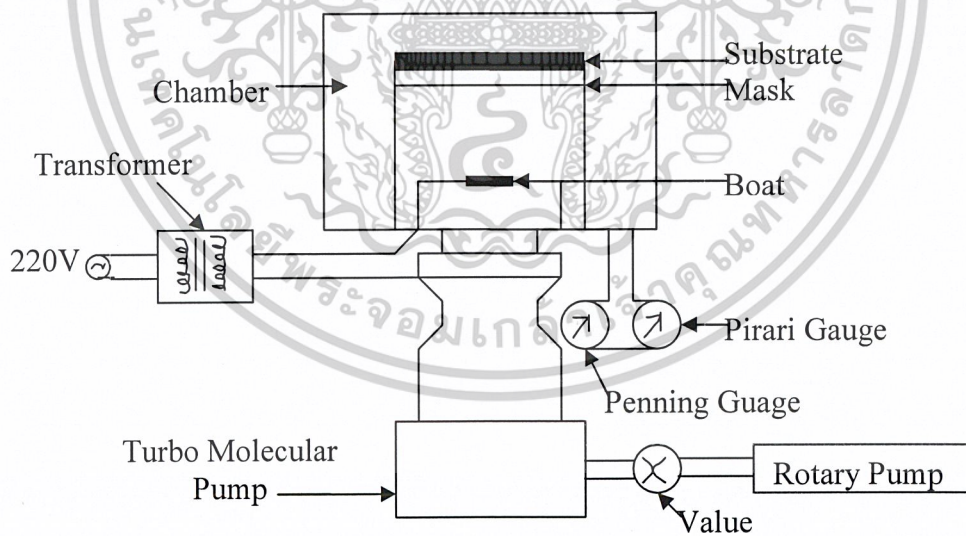
1. ภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารความร้อน
2. เบ้าหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่สารที่ใช้ในการระเหย
3. ฐานรองรับมักเป็นกระจกสโกลด์ทำหน้าที่รองรับไอของสารที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง
4. ชัตเตอร์ ทำหน้าที่เปิดกั้นไอระเหยของสาร
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอมสาร เพื่อใช้ในการระเหย ซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันต่ำ แต่จะให้กระแสสูง
6. แวริแอก ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง
7. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในสุญญากาศ
8. ปั๊มพัลลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันในระบบขึ้นต้น สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} มิลลิบาร์
9. ปั๊มพัลพิวซัน ทำหน้าที่ลดความดันในภาชนะ โดยทำงานร่วมกับปั๊มพัลลโรตาลี สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เครื่องทำความเย็น ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่ปั๊มพัลฟ์ฟิวซ์ชั้นเพื่อระบายความร้อนให้กับไอน้ำมัน



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางในสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งต่างๆภายในระบบสุญญากาศ

3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546, 2547]

ในการเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้วมีขั้นตอนในการเตรียม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
 2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไตรคลอโรเอททีลีน (TCE)
 3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน
 4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล
 5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรดกัดแก้วหรือกรดไฮโดรฟลูออริกเจือจางความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดคประจุ
 6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดคประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
 7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว ก็จะได้แผ่นรองรับที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้ว เพื่อนำไปใช้สำหรับการเคลือบเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนต่อไป

3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ [งามนิตย์, 2543; จิตินัย, 2546, 2547]

การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_xZn_{1-x}S$) ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% และผลึกผงซิงค์ซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% เตรียมได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

1. ทำการบดผลึกแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1g) กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

อัตราส่วนผสมของ Zn(X)	ปริมาณสารตั้งต้น(ทั้งหมด1กรัม)	
	CdS(g)	ZnS(g)
0.0	1.00	-
0.2	0.8557	0.1443
0.4	0.6898	0.3102
0.6	0.4971	0.5029
0.8	0.2704	0.7296
0.9	0.1414	0.8586
1.0		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่ซั่งแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 3. นำผงซิงค์ซัลไฟด์ไปซั่งตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้
 4. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่อบไว้แล้ว มาบดผสมกับผงซิงค์ซัลไฟด์ที่ซั่งเตรียมไว้ให้เข้ากัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 5. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ผสมซิงค์ซัลไฟด์ที่อบแล้วนำไปอัดเป็นเม็ด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยความดันสูงประมาณ 3.8 เมกะปาสกาล
 6. นำมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับภาชนะระเหยสาร แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำกระดาษต่อไป
 7. ส่วนสารตั้งต้นอีกชนิดหนึ่งคือผลึกผง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จากการตกตะกอนของสารละลาย $CdSO_4$, $ZnSO_4$, NH_3 และ Hydrazine dehydrate ที่อุณหภูมิ 80° [งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546] โดยการนำเอาผลึกผงในอัตราส่วนต่างๆ ที่ได้คำนวณแล้วจากงานวิจัยท่านอื่น ไปอบที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเอามาอัดเม็ดตามข้อ 5 ดังกล่าวข้างต้นต่อไป
- หมายเหตุ : ถ้าทำการอัดเม็ดสารทิ้งไว้นาน ก่อนทำการระเหยควรจะทำกรอบเม็ดสารก่อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_xS$) [งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546, 2547]

ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.2 โดยมีขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมันด้วยอะซีโตนและเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำผลึกแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ใส่ลงในภาชนะระเหยสารซึ่งเป็นโลหะทังสเตน
4. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้ากากลึงที่ทำมาจากแผ่นอลูมิเนียม เจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารว่าวาล์วผีเสื้อและวาล์วปล่อยอากาศเข้า ให้อยู่ตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. สับสวิทช์ไปที่ วาล์วหยาบ (roughing) และเปิดปั๊มพัลกล โรตาลี (ยี่ห้อ Edwards ชนิด Two stage รุ่น E2M8) รอจนความดันอยู่ในย่านมิลลิบาร์
7. สับสวิทช์กลับมาที่แบคกิ้ง (backing) และเปิดระบบน้ำวนให้ปั๊มพัลคัพฟิวชัน
8. รอจนเข็มติกกลับมาที่เดิม แล้วเปิดปั๊มพัลคัพฟิวชัน (ยี่ห้อ Edwards รุ่น 63-150M) รอประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 20 นาที เพื่อให้ให้น้ำมันในปั๊มพีเคื่อด
9. สับสวิทช์กลับไปทีวาล์วหยาบ ให้ความดันกลับมาอยู่ในย่านมิลลิบาร์
 10. สับสวิทช์กลับมาที่เบคและเปิดวาล์วพีเคื่อ รอกจนกระทั่งความดันอยู่ที่ 5.5×10^{-5} มิลลิบาร์
 11. เริ่มทำการระเหยสาร โดยมีกระจกสไลด์เป็นแผ่นรองรับ โดยการเสียบปลั๊กแบริแอกแล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 130 แอมแปร์ (อัตราการเคลือบอยู่ที่ประมาณ 88 นาโนเมตรต่อนาที)
 12. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแบริแอกและถอดปลั๊กออก
 13. ปิดวาล์วพีเคื่อ โดยสวิทช์ยังอยู่ที่ตำแหน่งเบค
 14. ปิดปั๊มคิฟิวชั่น และรอกนปั๊มพีเคื่อ โดยใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที
 15. ปิดระบบน้ำวนและปั๊มพีเคื่อโรตารี
 16. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ(chamber)
 17. นำกระจกสไลด์ที่เคลือบออกมา
 18. นำฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาความหนาด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก
 19. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance รังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5418 \AA
 20. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาลักษณะผิวหน้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 และ FESEM ยี่ห้อ HITACHI S - 370 Scanning Microscope
 21. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7800 สเปกโตรมิเตอร์ (UV/VISIBLE spectrometer JASCO7800) โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น ในช่วง 300-800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน
 22. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่ความเข้มแสงประมาณ 950 ลักซ์ และกรณีที่ไม่มีการฉายแสงเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่างๆ

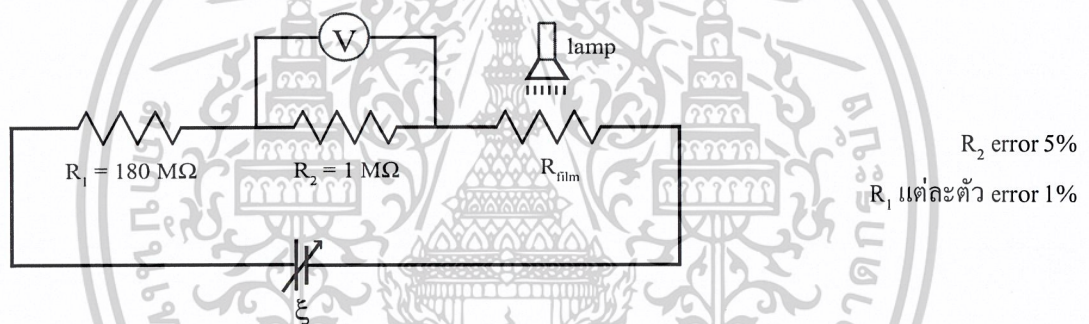
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น [งามนิศย์, 2543; ฐิติชัย, 2546, 2547]

3.5.1 อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่ 9 โวลต์ จำนวน 2 ก้อน
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอดฮาโลเจน 300 วัตต์
6. ลักซ์มิเตอร์

3.5.2 วิธีวัดความต้านทานของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

จากสมการ

$$\xi = I(R_1 + R_2 + R_{film})$$

$$I = \left(\frac{1}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (3.1)$$

จากการทดลองจริงจะทำการวัด V_{R_2} ซึ่งเป็นความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทาน $1 \text{ M}\Omega$ เนื่องจาก ฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมากระดับหลายสิบล้าน $\text{M}\Omega$ ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านวงจรในระดับที่ต่ำกว่า 10^{-6} A ดังนั้นความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R_2}) จะมีค่าอยู่ในระดับ mV ซึ่งวัดค่าได้ค่อนข้างแม่นยำจากการใช้มัลติมิเตอร์ ยิ่งให้กระแสไหลในวงจรต่ำเท่าไร ปัญหารอยต่อโอห์มมิกระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ จะมีผลลดลง จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{R2} = IR_2$$

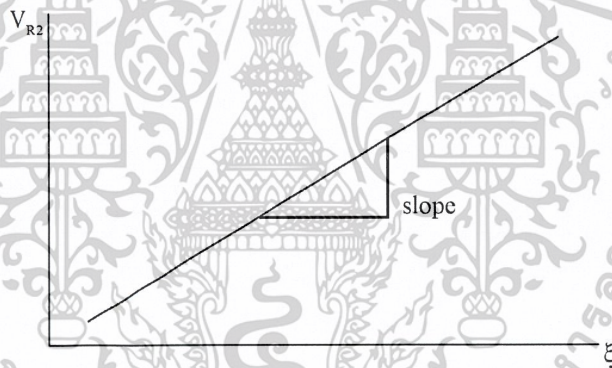
$$I = \frac{V_{R2}}{R_2} \quad (3.2)$$

แทนสมการ (3.2) ลงใน (3.1) จะได้

$$V_{R2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right) \xi \quad (3.3)$$

นำความสัมพันธ์ในสมการ (3.3) มาเขียนกราฟจะได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น

โดยมีความชันเท่ากับ $\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{film}} \right)$



$$\text{ดังนั้น } R_{film} = \frac{R_2}{\text{Slope}} - (R_1 + R_2) \quad (3.4)$$

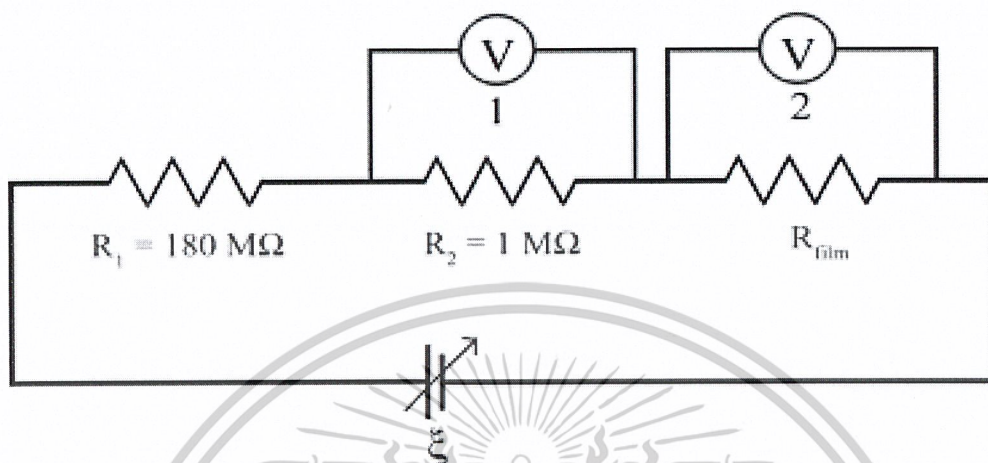
3.6 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ [งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546, 2547]

3.6.1 อุปกรณ์

1. ตัวอย่างฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_xS$) ที่ทำรอยต่อดั้วกาวเงินนำไฟฟ้าเต็มตามแบบที่ทำการวัดความต้านทานสองขั้ว
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
3. มัลติมิเตอร์
4. เตาให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ Programmable controller ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

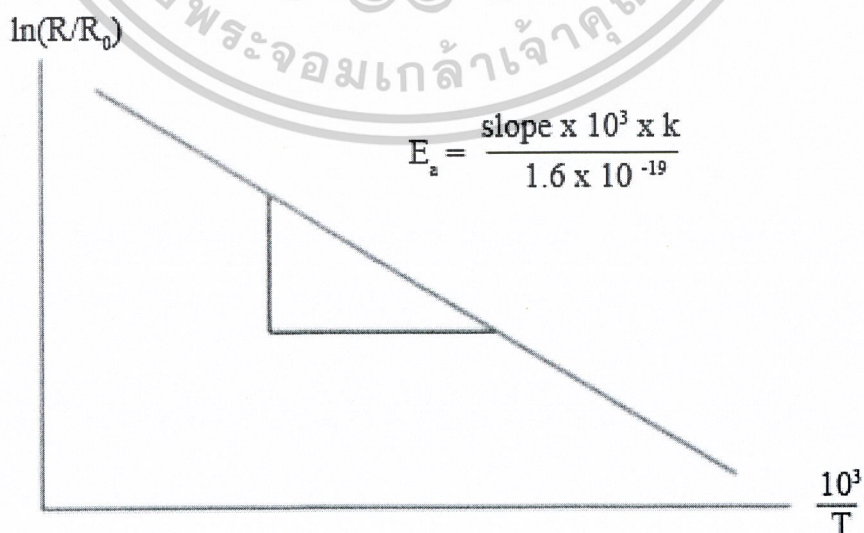
6. เทอร์โมมิเตอร์ Type K ยี่ห้อ DP-50A



รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอุณหภูมิต่างๆ

3.6.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการจ่ายแรงดันให้กับวงจร แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อม R_2 (V_{R2}) จะทำให้เราทราบค่ากระแสที่ไหลในวงจรได้ แล้วจะใช้ค่ากระแสค่านี้ทำการวัดค่าความต้านทานต่อไป
2. หลังจากนั้นปลดมิเตอร์ในข้อ 1 ออกแล้วนำมาต่อเข้ากับฟิล์มเพื่อวัดความต่างศักย์ตกคร่อมฟิล์ม โดยขณะวัดจะทำการให้ความร้อนกับฟิล์มด้วยโดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิไปเรื่อยๆ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวาดกราฟเป็นฟังก์ชันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หาค่าความต้านทานของฟิล์มบางจาก } R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3.5)$$

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \left(\frac{E_a}{10^3 k}\right)\left(\frac{10^3}{T}\right) \quad (3.6)$$

$$\therefore E_a = \frac{\text{slope} \times 10^3 \times k}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (3.7)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/k
 E_a = ค่าพลังงานกระตุ้น
 R = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิใดๆ
 R_0 = ความต้านทาน ณ อุณหภูมิห้อง
 T = อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้

4.1.1 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999%

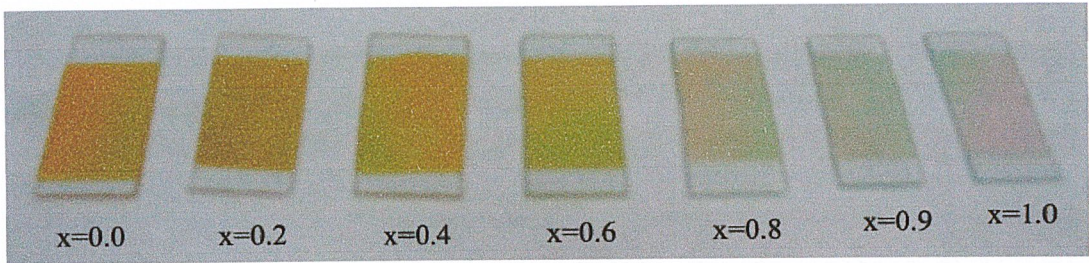
แผ่นฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จะมีสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดีและเหนียวยืดดี สีของแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลือง โดยความเข้มของสีเหลืองจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น (ZnS บริสุทธิ์จะโปร่งแสง) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของท่านอื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [จิตินัย, 2546; Lee; et.al. 2003]



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการเอนนีส

4.1.2 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี

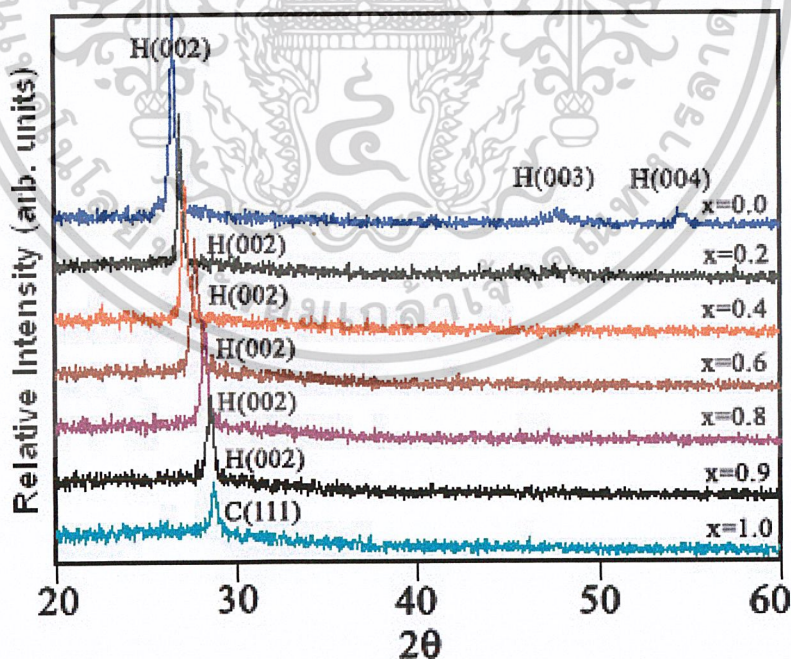
หลังจากการทำด้วยวิธีอบสารละลายระเหยสารเคมี พบว่ามีตะกอนของสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ เหลืออยู่ในอ่างเคมี ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโฮโมจีนีส (homogeneous reaction) [Dona, 1995] เราจึงนำตะกอนของสาร $Cd_{1-x}Zn_xS$ นี้มาเตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่มีอัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ อีกครั้ง ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเตรียมด้วย CdS และ ZnS ที่เป็นผงบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่4.2 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ของ CdS, ZnS และ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ค่า x ต่างๆ และต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเรจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับฟิคมมาตรฐานในรูปที่4.3



รูปที่4.3 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 ที่แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะเห็นว่าความเข้มของพีคจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนพีคเพิ่มขึ้นและพีคจะเลื่อนไปทางขวามือ (มุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในกรณีสารตั้งต้น CdS และ ZnS เป็นผงบริสุทธิ์สำหรับฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ($x < 0.9$) จะมีโครงสร้างแบบเวรีทไซท์ ส่วน ZnS จะมีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ มีทิศทางการจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (111) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์แนวการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีส่วนผสมของ ZnS 0-90% จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (เวรีทไซท์) แต่ที่ส่วนผสมของ ZnS 100% จะมีโครงสร้างแบบคิวบิก (ซิงค์เบลนด์) นั้นหมายความว่าช่วงของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ อยู่ในช่วง 90-100% นอกจากนี้ยังพบว่ามุมของการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (002) จะเลื่อนเป็นมุมสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ ZnS ที่สูงขึ้น แสดงว่าค่าคงที่โครงสร้างของระนาบ (002) ลดลงนั่นเอง ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันบนระนาบ (002) ของโครงสร้างเฮกซะโกนอล และระนาบ (111) ของโครงสร้างคิวบิก ดังนั้น ค่าคงที่ของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (a_0, c_0) สามารถเขียนได้ในรูปของค่าคงที่ของโครงสร้างแบบคิวบิก (a) แทนได้ โดยมีวิธีการคำนวณ a_0 กับ c_0 สำหรับทุกส่วนประกอบของแผ่นฟิล์ม ดังนี้ [Lee; et.al. 2003]

$$d_{002} = d_{111} \quad (4.1)$$

$$c_0 = 2a/(3)^{1/2} \quad (4.2)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$d_{110} = d_{220} \quad (4.3)$$

$$a_0 = a/(2)^{1/2} \quad (4.4)$$

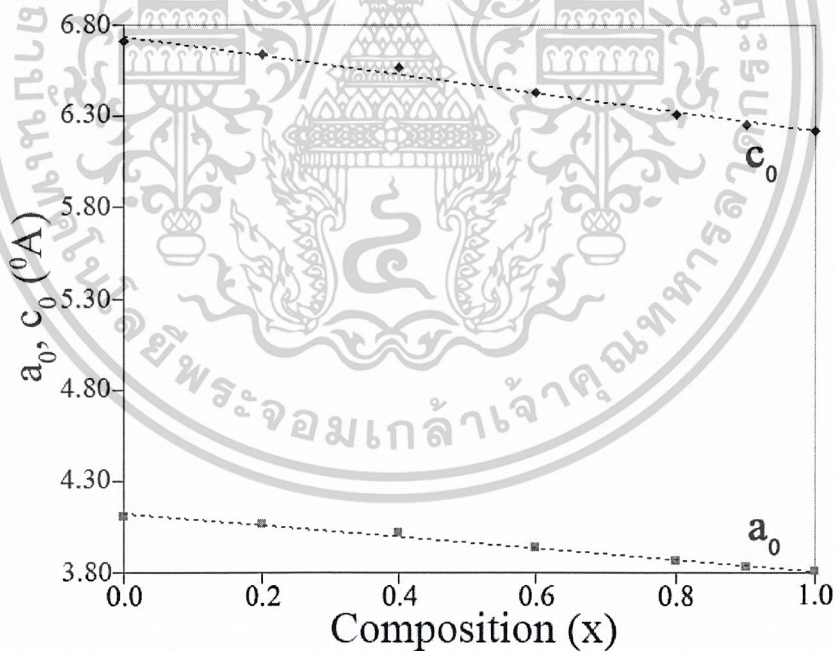
การผันแปรของค่าคงที่ของโครงสร้าง เมื่อเทียบกับค่า x แสดงได้ดังรูปที่ 4.4

เมื่อคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้าง ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนของค่า x ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก, FWHM, ขนาดเกรนของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส

Composition (x)	a_0 (\AA)	c_0 (\AA)	FWHM	Grain size(nm)
0.0	4.11	6.71	0.212	42
0.2	4.06	6.64	0.240	34
0.4	4.02	6.56	0.246	31
0.6	3.94	6.43	0.298	28
0.8	3.86	6.31	0.336	25
0.9	3.83	6.25	0.354	23
1.0	3.81	6.22	0.371	22



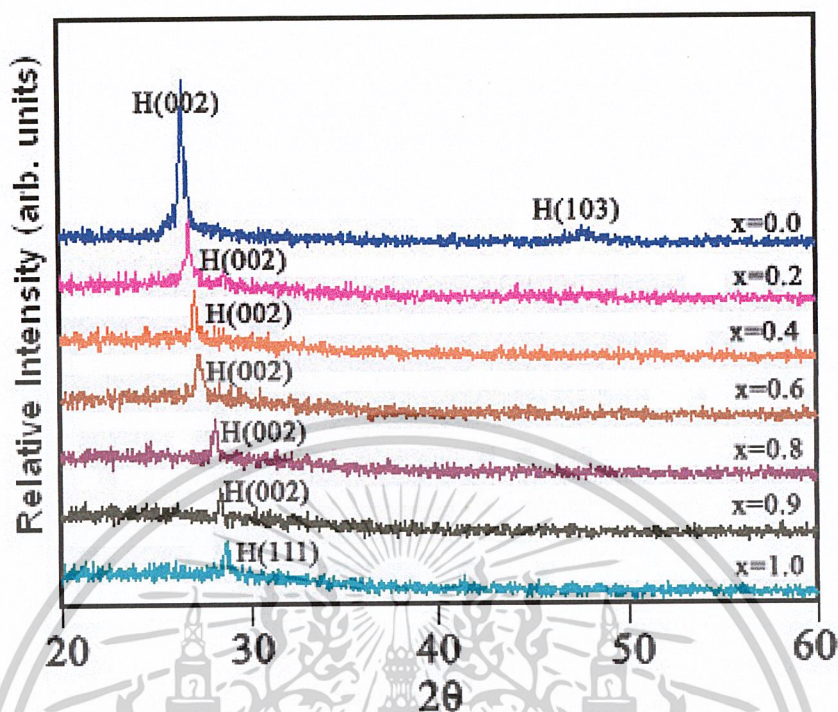
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กับ a_0, c_0 (\AA) ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส

โดยเส้นประจะเชื่อมค่าคงที่ของโครงผลึกของแผ่นฟิล์ม CdS กับฟิล์ม ZnS เข้าด้วยกัน

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงผลึกลดลงแบบเชิงเส้น

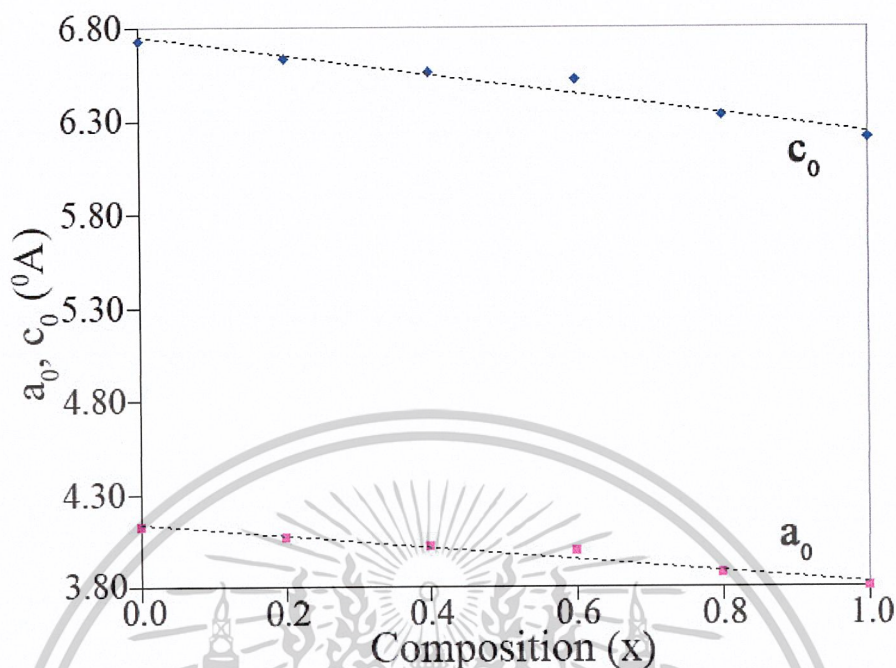
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

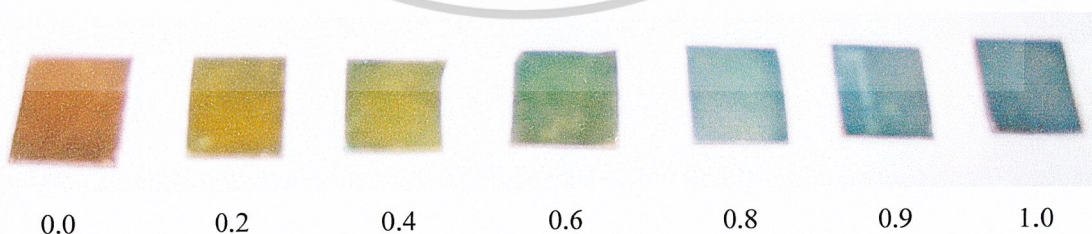
จากการวิเคราะห์แนวการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ความเข้มของพีคจะมีค่าลดลงเมื่อพีคเพิ่มขึ้นและพีคจะเลื่อนไปทางขวามือ (มุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 แล้วพบว่าพีคที่ได้ในแต่ละส่วนผสมของ ZnS นั้นมีโครงสร้างผลึกในแบบเดียวกันแต่ความเข้มของพีคจะน้อยกว่าของฟิล์มบางที่เตรียมโดยสารตั้งต้นเป็น CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณ a_0 กับ c_0 ได้ด้วยวิธีเดียวกับฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยสาร CdS และ ZnS บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของโครงผลึกลดลงแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กับ a_0, c_0 (Å) ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

4.3 ผลการศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของฟิล์มบาง และขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง ที่เตรียมโดยสาร CdS และ ZnS บริสุทธิ์ จากการนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ไปถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า นั้น ภาพที่ได้จะคงยังไม่เห็นเกรนของฟิล์มบางเนื่องจากฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมาก เราจึงนำฟิล์มบางทั้งหมดไปเคลือบด้วยทองดังรูปที่ 4.7

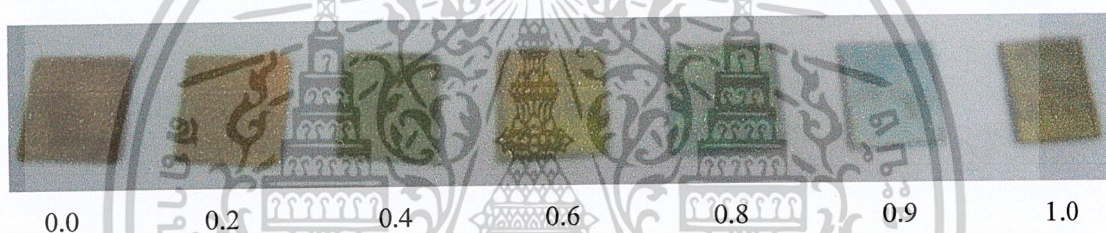


รูปที่ 4.7 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล ที่ถูกตัดแล้วนำไปเคลือบด้วยทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

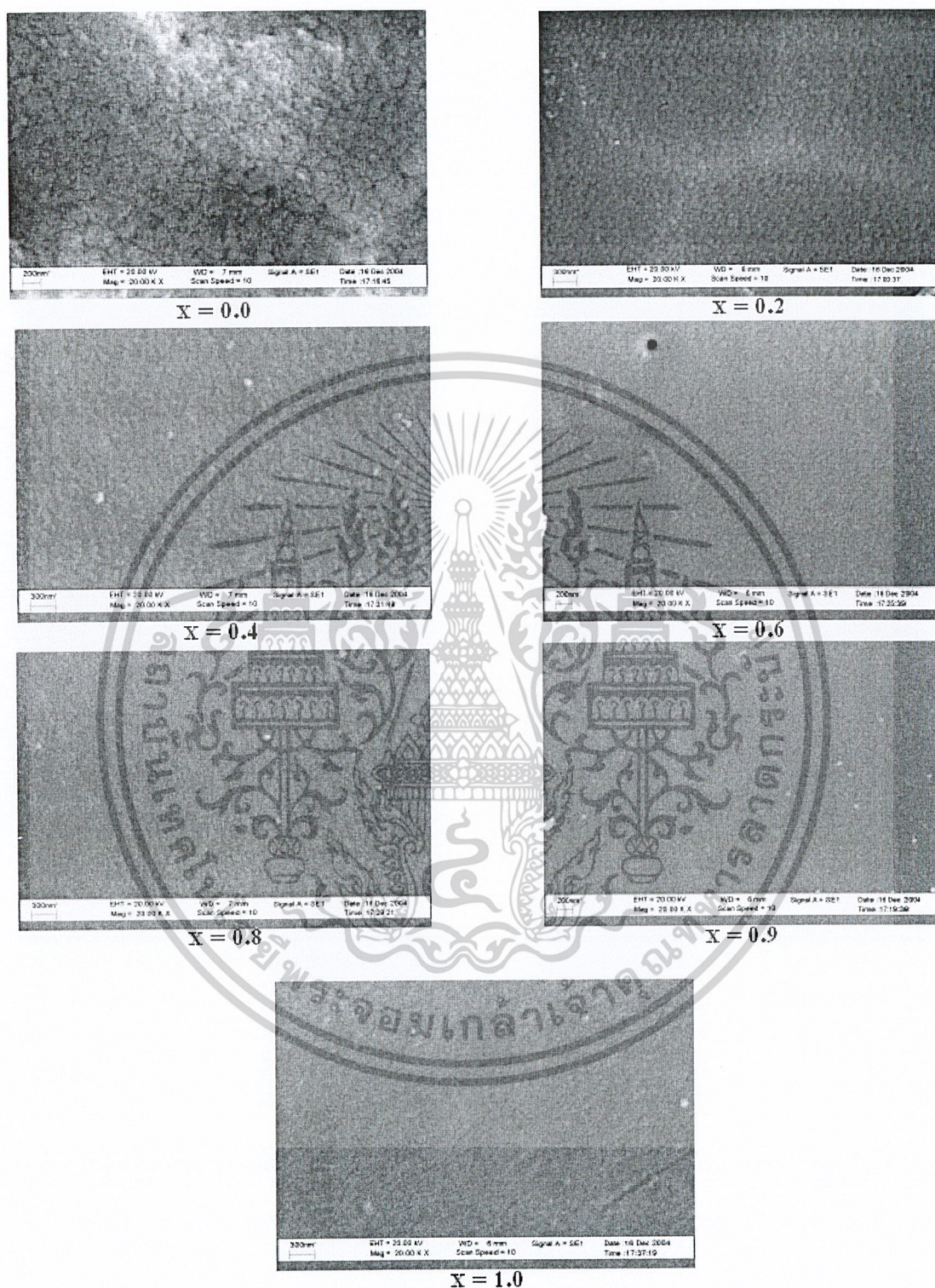
นำฟิล์มที่ได้กลับมาถ่าย SEM อีกครั้งที่กำลังขยายเดิม ก็ทำให้สามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางได้ เมื่อนำภาพที่ได้ในค่า x ต่างๆ มาวิเคราะห์ ที่ $x=0$ ลักษณะของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุด แต่เมื่อค่อยๆ เพิ่ม ZnS ขึ้น ลักษณะของเกรนก็ค่อยๆ มีขนาดลดลง จนที่ $x = 1.0$ ขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุดดังรูปที่ 4.8

ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางที่เตรียม ในกรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี โดยนำฟิล์มที่ตัดแล้วไปถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ก็ยังไม่เห็นเกรนเช่นเดียวกัน ดังนั้น เราจึงนำไป เคลือบด้วยทองเหมือนเดิม ได้ฟิล์มดังรูปที่ 4.9

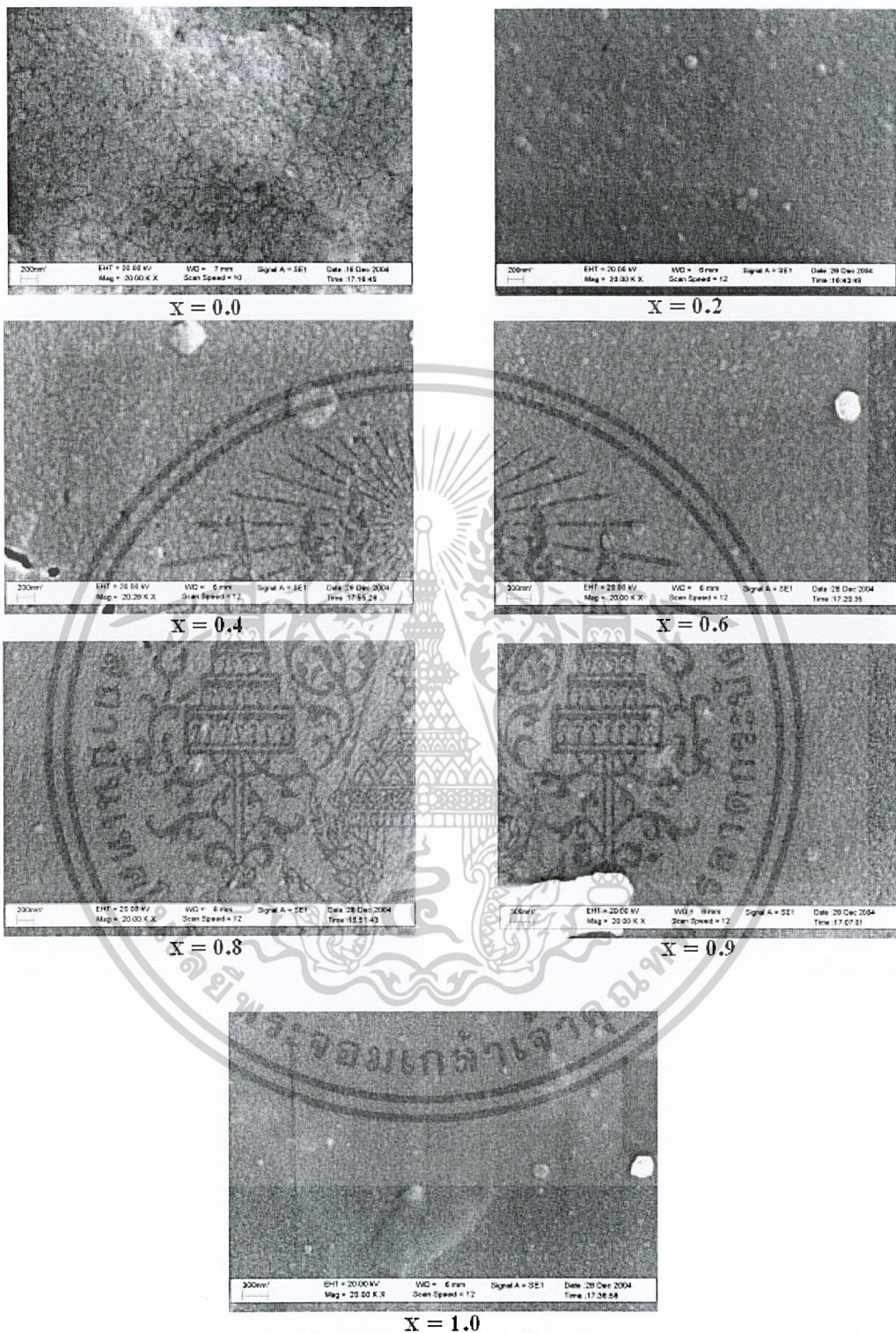


รูปที่ 4.9 ฟิล์มบาง Cd_xZn_xS ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อ ไม่มีการแอนนีส ที่ถูกตัดแล้วนำไปเคลือบด้วยทอง

แล้วนำฟิล์มที่เคลือบแล้วกลับมาถ่าย SEM อีกครั้งที่กำลังขยายเดิม ก็สามารถเห็นเกรนของฟิล์มบางได้เช่นกัน นำภาพที่ได้ ที่ค่า x ต่างๆมาวิเคราะห์ เมื่อ $x=0$ ลักษณะของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุด เช่นกัน แต่เมื่อค่อยๆเพิ่ม ZnS ขึ้น เกรนก็ค่อยๆ มีขนาดลดลงเช่นกัน จนที่ $x = 1.0$ ขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มของในกรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนรูปที่ 4.10 กับสารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% รูปที่ 4.8 พบว่า มีแนวโน้มของเกรนที่มีขนาดเล็กลงเมื่อ ZnS เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.8 ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง Cd_xZn_{1-x}S ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล ที่ถ่ายด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส ที่ถ่ายด้วย SEM โดยใช้กำลังขยาย 20,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการถ่ายภาพ SEM ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่าสำหรับทั้ง 2 กรณี ในอัตราส่วนของ x ค่าต่างๆ ที่ถ่ายด้วยกำลังขยาย 20,000 เท่า ภาพที่ถ่ายได้เห็นเกรนไม่ชัด เพราะฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีเกรนที่เล็กมาก ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ไปถ่าย SEM ใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มกำลังขยายเป็น 50,000 เท่า แต่ภาพที่ได้จะไม่ชัดเพราะเบลอมาก

ดังนั้นจึงทดลองนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x = 0.2$ ไปถ่ายภาพด้วย FESEM ณ. TMEC โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า ได้ภาพที่ชัดขึ้นสามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางได้ดังรูปที่ 4.11

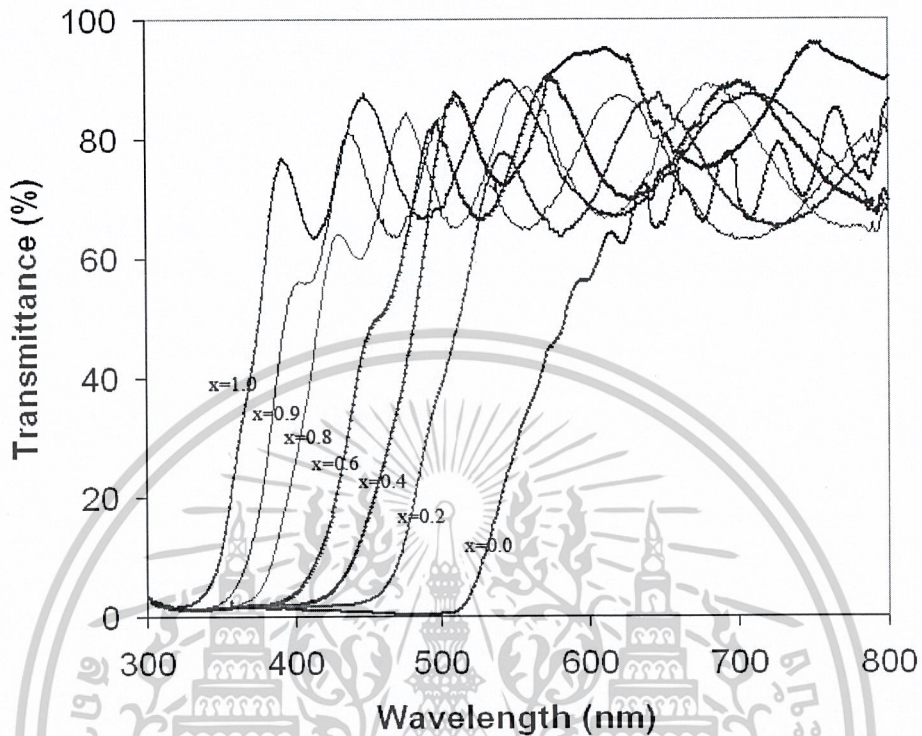
Standard.bmp



3/31/2005 1.0kV SE(M) x50.0k

รูปที่ 4.11 ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมของ $x = 0.2$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัลที่ถ่ายด้วย FESEM โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า

4.4 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

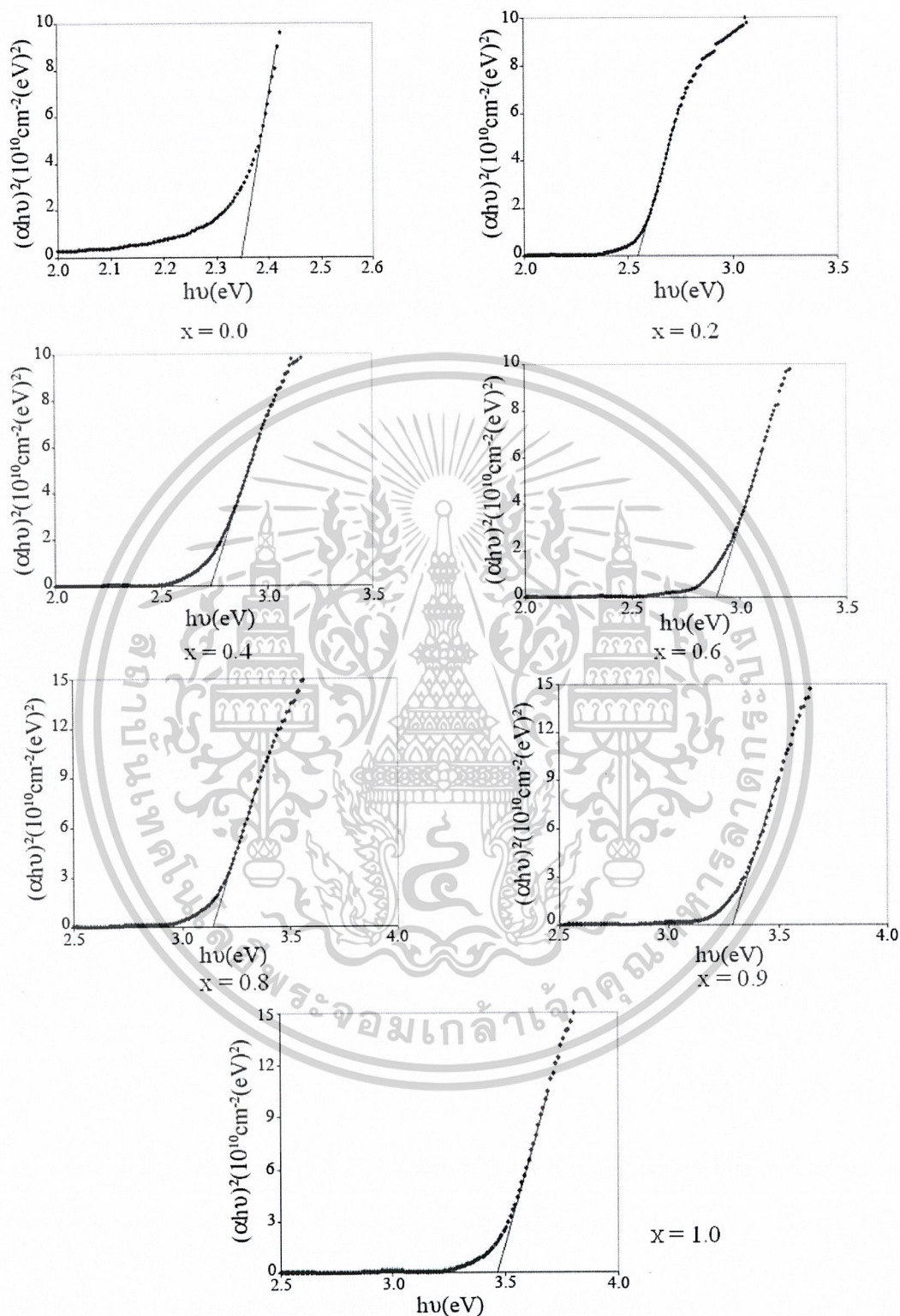


รูปที่ 4.12 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีกัล

รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร พบว่าขอบของการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า เมื่อสัดส่วนการเจือ Zn เพิ่มขึ้น หมายความว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อเจือ Zn เพิ่มมากขึ้น

เขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เพื่อหาค่า E_g ดังรูปที่ 4.13

แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่ออัตราส่วนผสมของ x มากขึ้นจะทำให้ ค่า E_g มากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2

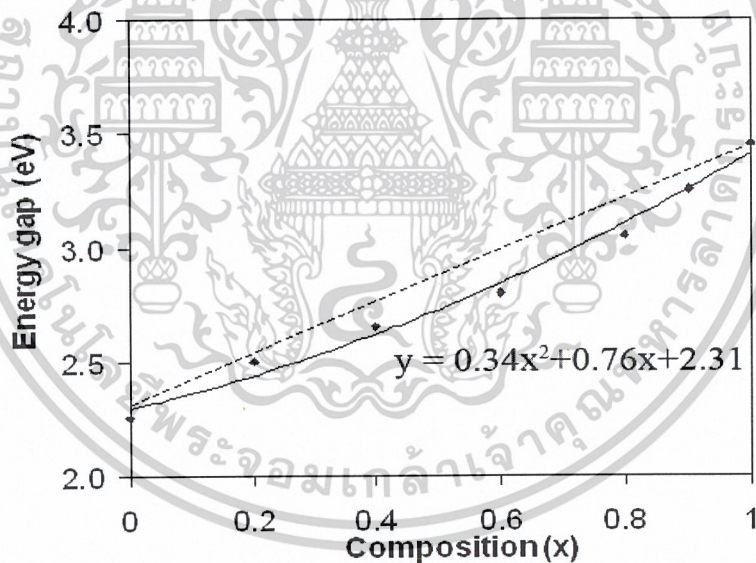


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนีส เพื่อหาค่า E_g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในที่ที่กรณีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล

อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ	ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน: E_g (eV)
0.0	2.31
0.2	2.55
0.4	2.72
0.6	2.89
0.8	3.14
0.9	3.29
1.0	3.47



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากรูปที่ 4.14 บอกให้ทราบว่าความสัมพันธ์ของค่าช่องว่างแถบพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมค่า x ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนผสมค่า x ของฟิล์มบางนั้นสามารถกำหนดจากช่องว่างแถบพลังงานได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

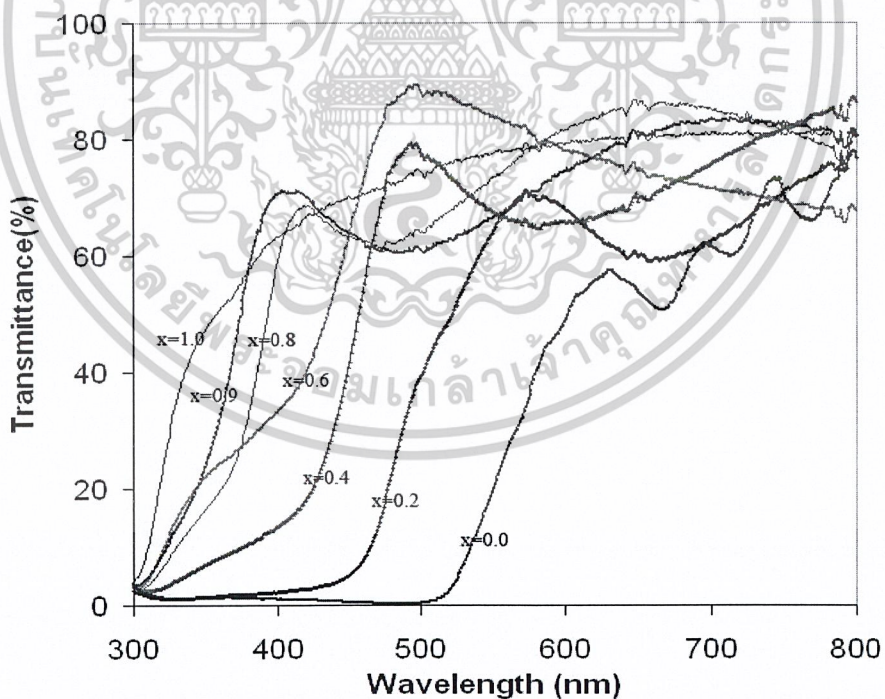
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีนี้ค่า E_g อยู่ในช่วง 2.31 – 3.47 ($x = 0$ ถึง $x = 1.0$) ค่าของแถบพลังงานต้องห้าม $E_g(x)$ หาได้จาก (Lee; et.al. 2003)

$$E_g(x) = E_g(\text{CdS}) + (E_g(\text{ZnS}) - E_g(\text{CdS}) - b)x + bx^2 \quad (4.5)$$

เมื่อ $E_g(\text{CdS})$ และ $E_g(\text{ZnS})$ เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdS และ ZnS ตามลำดับ และ b คือค่าพารามิเตอร์โบว์ริง (bowing parameter) ค่าบนเส้นทึบแสดงให้เห็นค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากการทดลองสำหรับฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ จะให้ค่า $E_g(\text{CdS}) = 2.31 \text{ eV}$, $E_g(\text{ZnS}) = 3.47 \text{ eV}$ และ $b = 0.34 \text{ eV}$

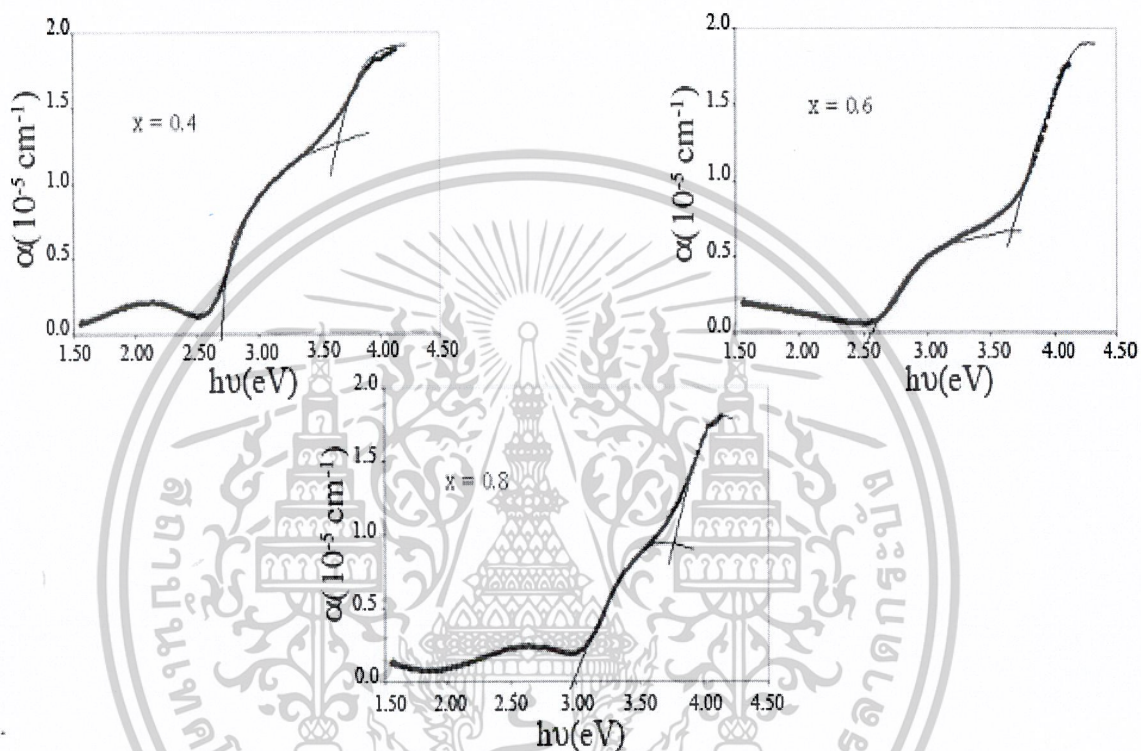
จากนั้นทำการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี ดังรูปที่ 4.15 เพื่อหาค่า E_g เช่นเดียวกับในกรณีแรกและนำผลที่ได้ทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.15 กราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีนี้สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากการตกตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่การแอนนัล

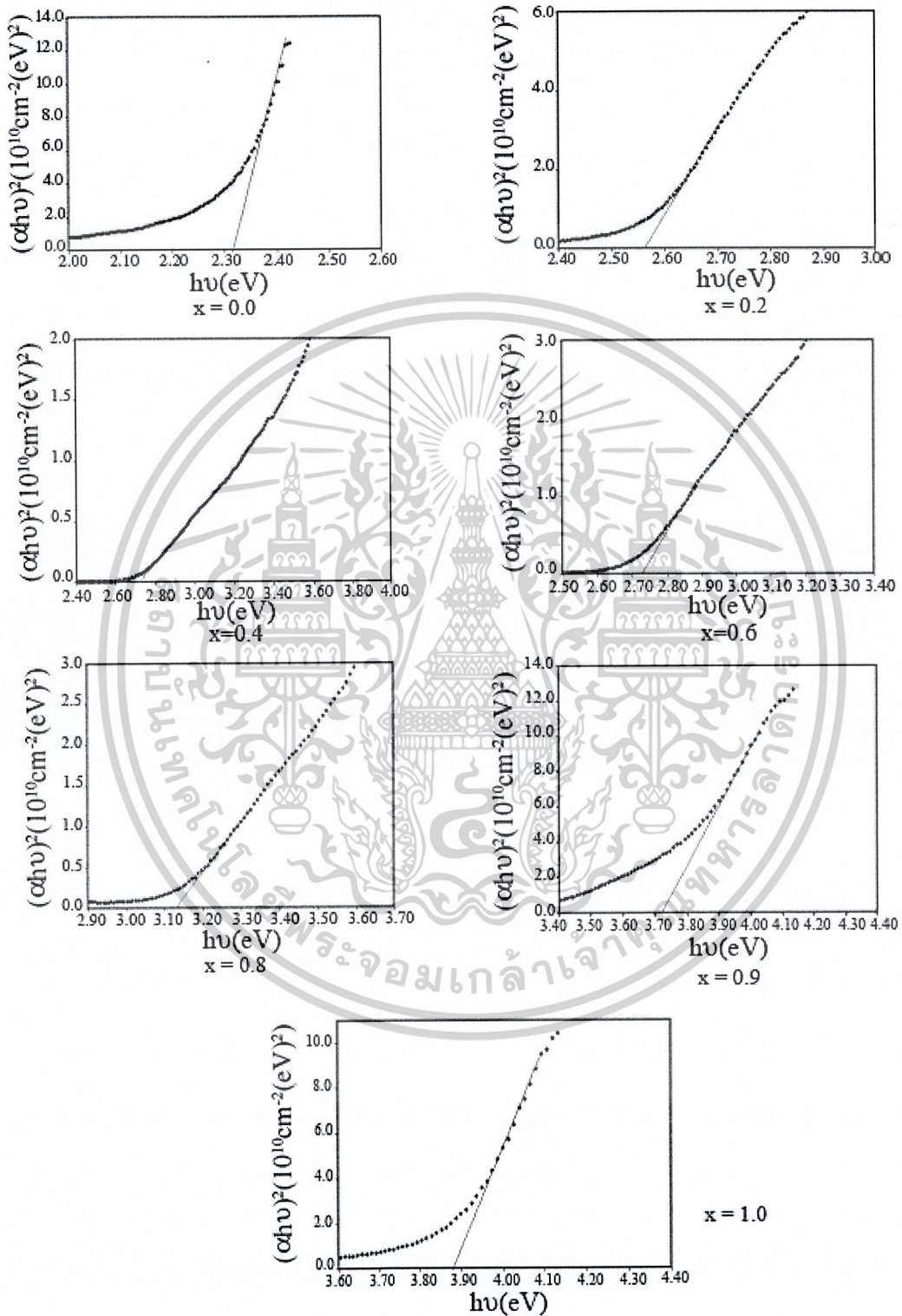
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อดูจากกราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ พบว่าที่ $x = 0.4, 0.6$ และ 0.8 มีค่า E_g มากกว่า 1 ค่า ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟระหว่าง α กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่การแอนนัล เพื่อแสดงว่ามี E_g มากกว่า 1 ค่า

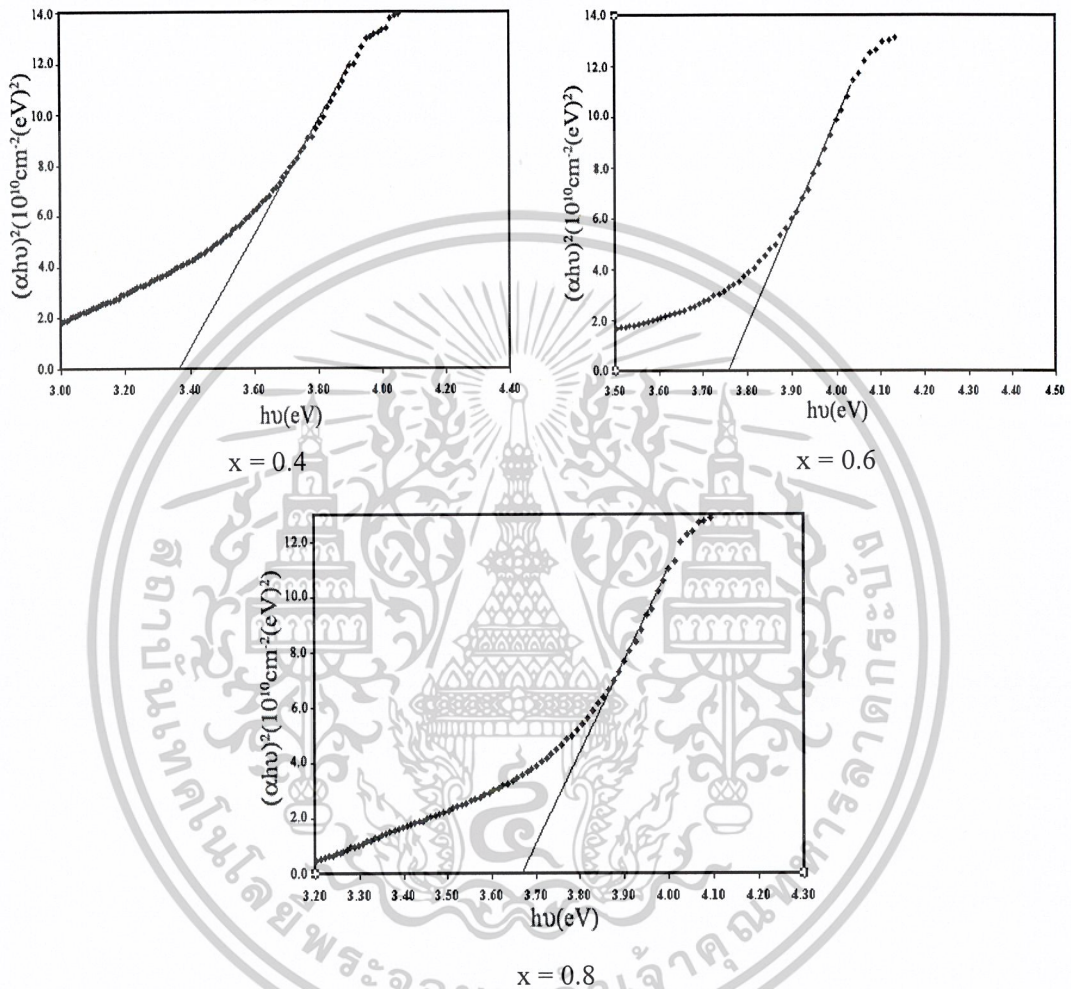
เขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เพื่อหาค่า E_g ได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี

เมื่อไม่มีการแอนนิล เพื่อการหาค่า E_g
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่มีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เพื่อการหาค่า E_{g2} ดังรูปที่ 4.18



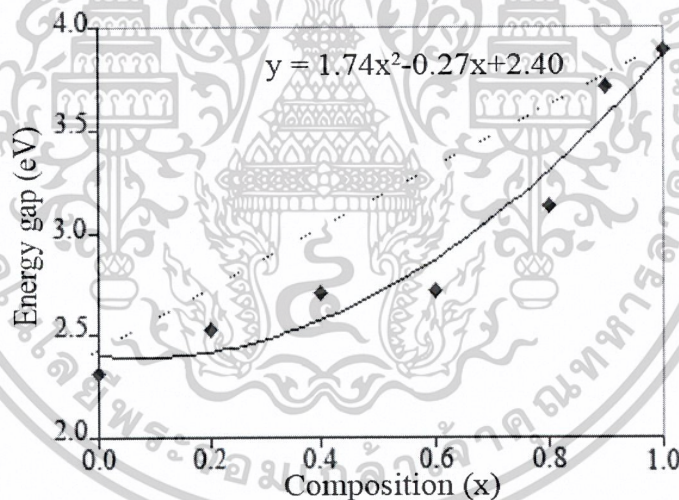
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่มีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีกัล เพื่อการหาค่า E_{g2}

แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่มีสารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่ออัตราส่วนผสมของ x มากขึ้นจะทำให้ค่า E_g มากขึ้นและบางอัตราส่วนผสมจะให้ค่า E_g มากกว่า 1 ค่า แสดงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

อัตราส่วนผสม x ค่าต่างๆ	ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน: E_{g1} (eV)	ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน: E_{g2} (eV)
0.0	2.31	-
0.2	2.53	-
0.4	2.70	3.36
0.6	2.72	3.75
0.8	3.13	3.67
0.9	3.71	-
1.0	3.89	-



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากรูปที่ 4.19 ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีบอกให้ทราบว่าความสัมพันธ์ของค่าช่องว่างแถบพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ x ในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนผสมค่า x ของฟิล์มบางนั้นสามารถกำหนดจากช่องว่างแถบพลังงานได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ สำหรับกรณีนี้ค่า E_{g1} อยู่ในช่วง 2.31 – 3.89 ($x=0$ ถึง $x=1.0$) ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะให้ค่า $E_{g1}(CdS) = 2.31$ eV, $E_{g1}(ZnS) = 3.89$ eV และ $b = 1.74$ eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในวงจำกัดการเข้าถึงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

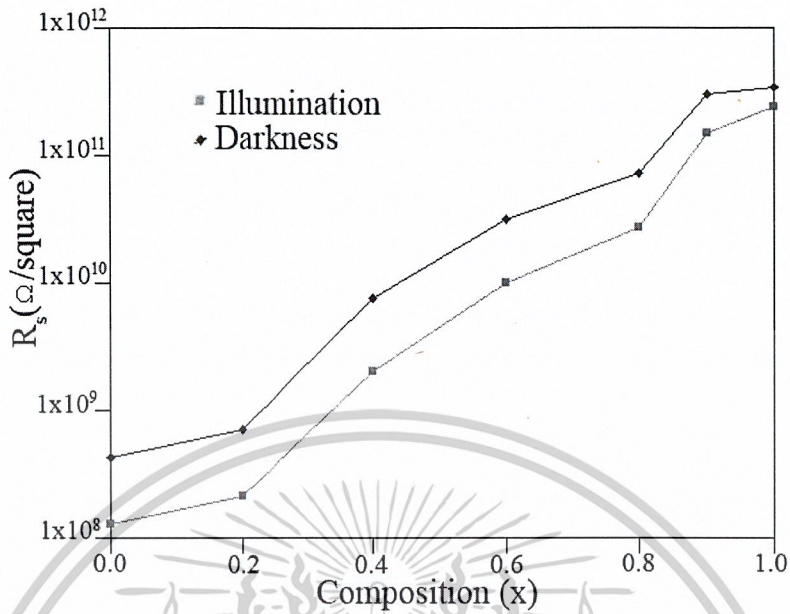
4.5 ผลการทดลองความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

ทำการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี ในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนชนิด ELH จากรูปที่ 4.20 และ รูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อ ZnS เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เมื่อมีการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ชนิด ELH จะทำให้มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบนำ ซึ่งจะให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และจะส่งผลให้ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% มีความต้านทานแผ่นที่ลดลง แสดงในตารางที่ 4.4

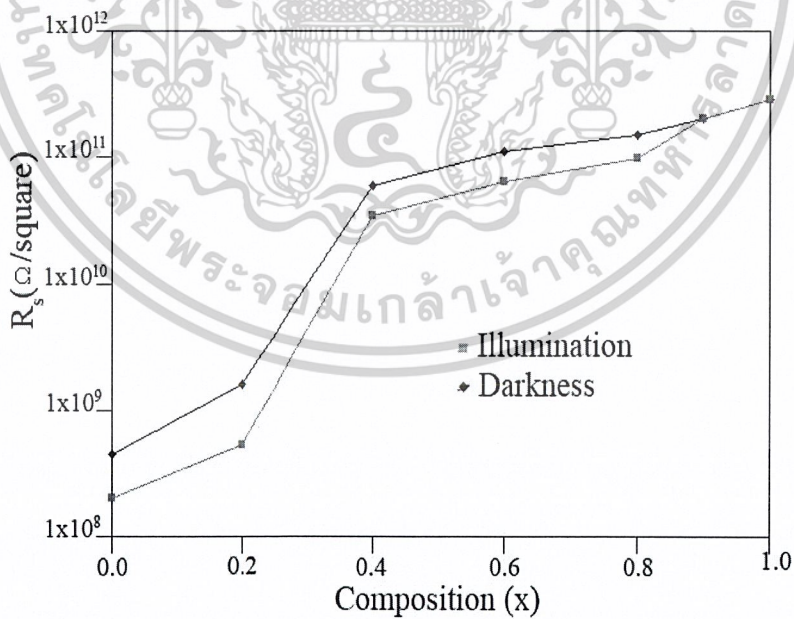
ตารางที่ 4.4 แสดงสภาพความต้านทานไฟฟ้าในกรณีไม่มีการฉายแสง และมีการฉายแสงของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ ทั้งกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีส

Composition (x)	R_s (Ω /square)			
	Darkness		Illumination	
	Pure	Colloid	Pure	Colloid
0.0	4.2×10^8	4.5×10^8	1.3×10^8	2.0×10^8
0.2	7.1×10^8	1.6×10^9	2.1×10^8	5.3×10^8
0.4	7.6×10^9	6.0×10^{10}	2.0×10^9	3.4×10^{10}
0.6	3.2×10^{10}	1.1×10^{11}	1.0×10^{10}	6.4×10^{10}
0.8	7.2×10^{10}	1.5×10^{11}	2.7×10^{10}	9.9×10^{10}
0.9	3.0×10^{11}	2.0×10^{11}	1.5×10^{11}	2.0×10^{11}
1.0	3.4×10^{11}	2.9×10^{11}	2.4×10^{11}	2.9×10^{11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ความบริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีไม่ฉายแสงและมี การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH



รูปที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของค่า x ต่างๆ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล ในกรณีไม่มีการฉายแสงและมี การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

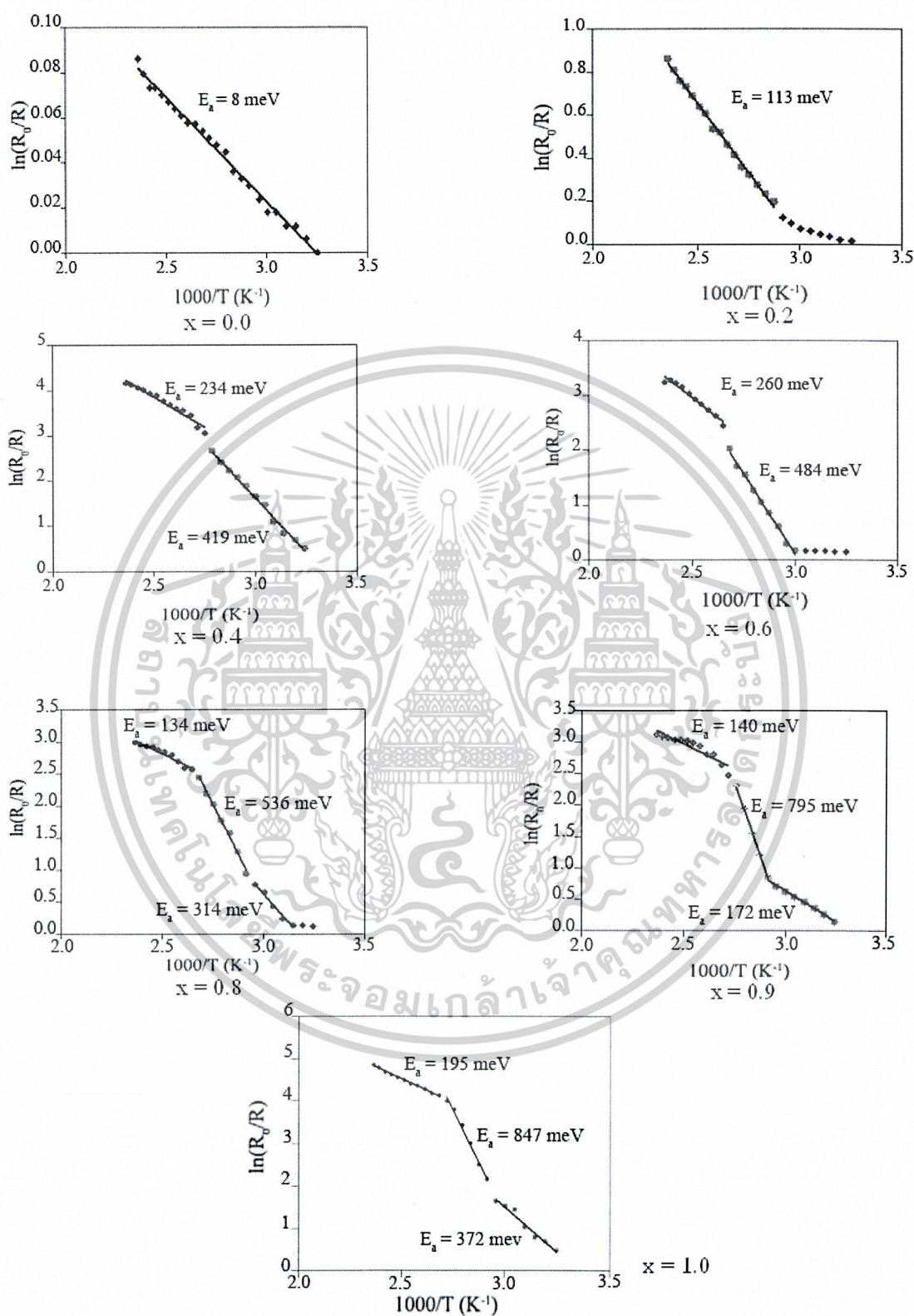
4.6 ความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

จากตารางที่ 4.5 การวัดค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ กรณีที่เป็นสารตั้งต้นเป็นผลึก CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% พบว่าที่ x เท่ากับ 0.0 - 0.2 มีค่าเดียว แต่เมื่อ x เท่ากับ 0.4 - 1.0 พบว่ามีมากกว่า 1 ค่า สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้ดังรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdS และ ZnS บริสุทธิ์ 99.999% เมื่อไม่มีการแอนนัล

Composition (x)	Activation Energy (meV)		
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}
0.0	8	-	-
0.2	113	-	-
0.4	419	234	-
0.6	484	260	-
0.8	536	314	134
0.9	795	172	140
1.0	847	372	195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆกรณีทีสารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ทีมีความบริสุทธิ์ 99.99% เมื่อไม่มีการแอนนัล

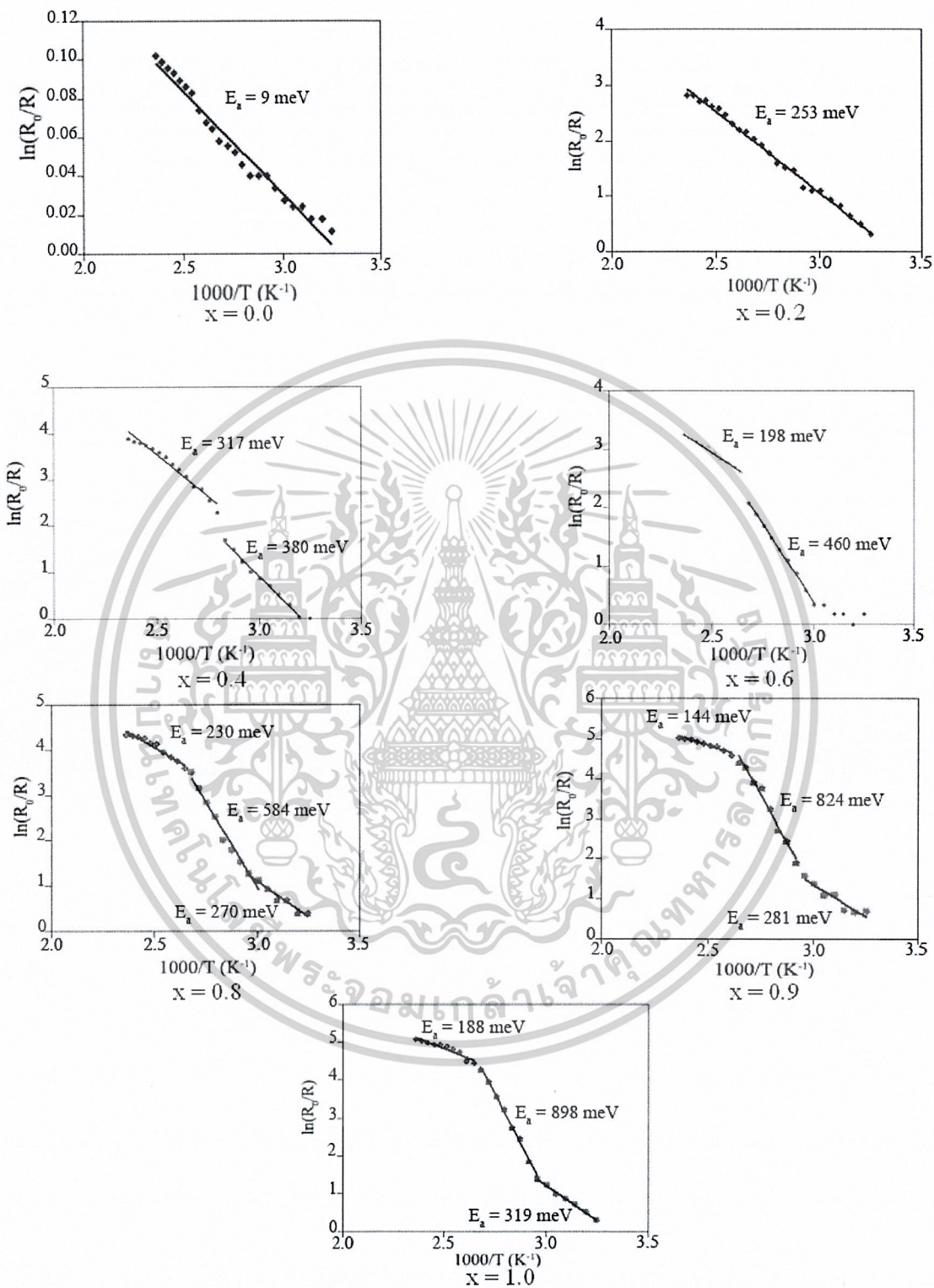
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 จากการวัดค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี พบว่าที่ x เท่ากับ 0.0 - 0.2 มีค่าเดียว แต่เมื่อ x เท่ากับ 0.4 - 1.0 พบว่ามีมากกว่า 1 ค่า ดังรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนของ x ค่าต่างๆกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนัล

Composition (x)	Activation Energy (meV)		
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}
0.0	9	-	-
0.2	253	-	-
0.4	380	317	-
0.6	460	198	-
0.8	584	270	230
0.9	824	281	144
1.0	898	289	188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟระหว่าง $1000/T$ กับ $\ln(R_0/R)$ ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ x ค่าต่างๆ กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีก

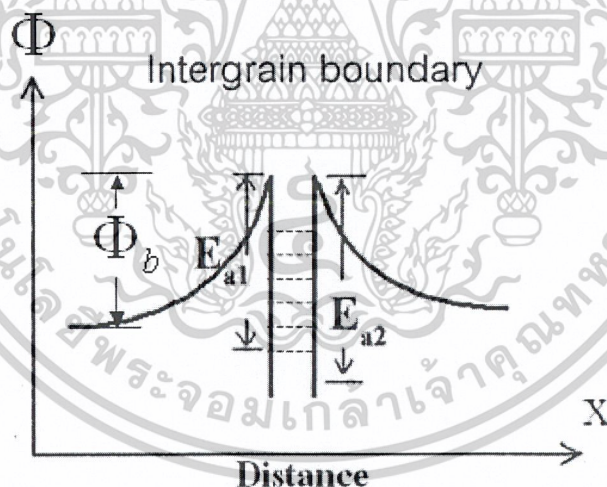
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง 2 กรณี อธิบายได้ว่า เมื่อ E_g มีค่าเดียว เป็นค่าแพนดิกซ์ที่บริเวณขอบของเกรน เมื่อเกรนเล็กลง ค่าของค่าแพนดิกซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า อธิบายได้จากสมการที่ 2.32

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

เมื่ออุณหภูมิมีค่ามากขึ้น ค่าแพนดิกซ์จะมีค่าลดลง ส่งผลให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

แต่เมื่อ E_g มีมากกว่า 1 ค่า อธิบายว่าอาจเกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนถูกจับไว้โดยกับดัก ซึ่งระดับพลังงานย่อยนี้มีอยู่สองระดับ ดังนั้นเมื่อเราให้พลังงานความร้อนแก่ฟิล์มบางอิเล็กตรอนสามารถกลับขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ [Dhage, 2004; วีรชัย, 2546] ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงระดับพลังงานศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรนในฟิล์มบาง CdS – ZnS ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอนโดยที่ ϕ_b คือความสูงของค่าแพนดิกซ์ และ x คือระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นเตรียมฟิล์มบาง และเน้นทางด้าน การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางจนถึงขั้นการวิเคราะห์ผลสุดท้าย พร้อมด้วยข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

5.1 สรุปผลการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศ

ในโครงการงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบาง แคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_xS$) โดยมีอัตราส่วนผสมของ $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, 1.0$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกผง แคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% กับผลึกผงซิงค์ซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% และผลึกผงแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี โดยการคำนวณอัตราส่วนผสมของสารแล้วนำไปอัดเม็ด เพื่อป้องกันการกระเด็นของสารในระบบสุญญากาศเมื่อได้รับความร้อน ผลที่ได้คือฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี ยึดติดกับฐานรองรับได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีสีเหลืองเข้มและสีจะเริ่มอ่อนจางลงตามสัดส่วนของ Zn ที่เพิ่มขึ้น

5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ

สุญญากาศ

จากการศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีทิศทางการจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (111) โดยจะเป็นโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล และแบบคิวบิกตามลำดับ ขึ้นอยู่กับการจัดเตรียม เมื่อส่วนผสมของ ZnS 100% จะมีโครงสร้างที่เปลี่ยนจากเฮกซะโกนอลเป็นแบบคิวบิกทั้งในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% และกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี นอกจากนี้ยังพบว่ามุมของการเลี้ยวเบนจะเลื่อนเป็นมุมที่สูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ ZnS ที่สูงขึ้น ขนาดของเกรนที่คำนวณได้นั้นมีค่าลดลงเมื่อ ZnS เพิ่มขึ้นซึ่งตรงกับภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ SEM เมื่อเปรียบเทียบความเข้มฟลักของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% จะมีความเข้มฟลูออเรสเซนซ์มากกว่ากรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมี อาจเป็นเพราะว่า กรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีนั้นมีความสกปรกไม่บริสุทธิ์ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ สามารถคำนวณได้ทั้ง 2 กรณี คือค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมของ ZnS เพิ่มขึ้น [Lee; et.al.2003]

จากการถ่ายภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ภาพที่ถ่ายจะเห็นได้นั้นต้องนำฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ไปเคลือบด้วยทองคำก่อน ภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่าถ้าสัดส่วนของ Zn เพิ่มขึ้นขนาดเกรนของฟิล์มบางจะมีขนาดเล็กลง

จากการวิเคราะห์การส่งผ่านทางแสง พบว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้ทั้ง 2 กรณีมีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผง CdS และ ZnS ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% อยู่ในช่วง 2.31 - 3.47 eV สามารถคำนวณหาค่า พารามิเตอร์ โบว์ริง (bowing parameter) ได้เท่ากับ 0.34 และค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ฟิล์มบางที่เตรียมได้ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีอยู่ในช่วง 2.31- 3.89 eV สามารถคำนวณหาค่า พารามิเตอร์ โบว์ริง ได้เท่ากับ 1.74 สรุปได้ว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Zn เพิ่มขึ้น [Lee;et.al.2003]

จากการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้ง 2 กรณี พบว่าค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าลดลงกว่าเดิมเมื่อทำการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนชนิด ELH [งานนิษฐ์, 2543; วีรชัย, 2546] สำหรับกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึกผงที่ได้จากตะกอนในอ่างเคมีนั้น ที่ x เท่ากับ 0.9, 1.0 ค่าความต้านทานไม่ลดลงอาจเป็นเพราะว่าฟิล์มบางมีความต้านทานสูงมาก ทำให้พลังงานที่ใช้กระตุ้นนั้นมีค่าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ

จากการวัดค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์ม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ทั้ง 2 กรณี พบว่าที่ E_g มีค่าเดียวอธิบายกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบของเกรนได้ว่า เมื่อเกรนเล็กลง ค่าของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า แต่เมื่อ E_g มีมากกว่า 1 ค่า เกิดจากการที่มีระดับพลังงานย่อยตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรน ซึ่งเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนถูกจับไว้โดยกับดัก ซึ่งระดับพลังงานย่อยนี้มีอยู่สองระดับ ดังนั้นเมื่อเราให้พลังงานความร้อนแก่ฟิล์มบาง อิเล็กตรอนสามารถกลับขึ้นมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้

5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

1. การเตรียมฟิล์มบาง

- กระดาษไครต์ควรกัดด้วยกรดกัดแก้ว ก่อนเตรียมฟิล์มเพื่อให้ได้ฟิล์มที่เกาะติดดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การระเหยสารในระบบสุญญากาศ ควรนำสารไปอัดเป็นเม็ดเล็กๆ ก่อน เพื่อป้องกันการกระเด็นของสารภายในระบบสุญญากาศ เมื่อได้รับความร้อน
- การทำงานในระบบสุญญากาศควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกต่างๆ จากผู้ทดลอง ผู้ระบบสุญญากาศได้
- ก่อนทำการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ควรตรวจสอบความสะอาดของเครื่องมือ และ เช็คสภาพเครื่องก่อนทุกครั้ง

2.การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

- การถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM นั้น ถ้าไม่เห็นเกรน ให้นำฟิล์มบางไปเคลือบด้วยทองก่อน แล้วนำกลับมาถ่ายภาพอีกครั้ง
- การวัดความต้านทานแผ่นนั้น กระแสที่ไหลผ่านวงจรควรอยู่ในระดับต่ำกว่า 10^{-6} A เนื่องจากปัญหารอยต่อโอห์มมิก ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าที่ลดลง
- การทำการทดลองวัดสมบัติทางแสงหรือทางไฟฟ้าควรทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมฟิล์มบางได้ เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- Tuttle, J.R.; Szalaj, A. and Keane, J. A 15.2% AMO/1433 W/KG Thin Films Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell for Space Applications. **28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference**. September 15-22, 2000.
- Lee, J.H.; Song, W.C.; Yi, J.S.; Yang, K.J.; Han, W.D. and Hwang, J. 2003. Growth and properties of the Cd_{1-x}Zn_xS thin films for solar cells applications. **Thin Solid Films**. 431-432:349-353.
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-rays Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company Inc.:pp 9-14.
- Kittel, C. 1971. **Introduction of Solid State Physics**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc.:pp 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
- งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. การเตรียมฟิล์มบาง Cds ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บัญชา ชนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคฟิล์มแฟรกชัน. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น):หน้า 9, 12-15, 25.
- สิงห์เดช แต่งจวง. 2539. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Abelas, F., in **Optical of Solids** PP.23-40, North-Holland, London, 1972.
- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrumentation**. New York.:Mc-GrawHill:Bombary.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อารีย์ วิเชียรฉาย. 2543. เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. เอกสารประกอบการเรียน.
คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

Garadkar,K.M.;Hankare,P.P.and Patil R.K. 1999. Effect of indium doping on structural, optical
and electrical properties of $Cd_{0.95}Hg_{0.05}S$ thin films. **Mater.Chem.Phys.** 58.:64-70.

Ramaiah,K.S. 1999. Electrical properties of in doped CdS thin films. **J.Mater.Sci.Mater.Elec.**
10 :291-294.

Gacia-Cuencu,M.V.;Morenza,J.L.and Codina,J.M. 1987. Electrical condition in polycrystalline
CdS films:I.theory. **J.Phys.D:Appl.Phys.** 20 :951-957.

Gacia-Cuencu,M.V.;Morenza,J.L.;Bertran,E. and Lousa,A. 1987. Electrical condition in
polycrystalline CdS films:II. Comparison of theory and experiment.
J.Phys.D:Appl.Phys. 20 :958-962.

Gunal,I.and Parlak,M. 1997. Current transport mechanisms in low resistive CdS thin films.
J.Mater.Sci.Mater.Elec. 8 :9-13.

Ohring,M. 2002. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure.** 2nd ed.
Sandiego,CA:Academic Press:pp.58-69,71,97-101,106-109,118-121.

McGuire,G.E. 1988. **Semiconductor Materials and Process Technology Handbook.** Park
Ridge,NJ:Noyes:pp.340-343,349.

Harris,N.S. 1989. **Modern Vacuum Practice.** London:McGraw-Hill.:pp.71-73, 76-77, 114, 118-
120.

ชัยวิทย์ ศิลาวัชานาไณย. 2526. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ. กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริม
เทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น):หน้า 9-15, 25-26.

Gilmore,A.S. 2000.**Studies of the Basic Electronic Properties of CdTe and CdS Thin Films
and CdTe/CdS Solar Cells.** Thesis Proposal Colorado School of Mines.

Dieter K.Schroder D.K., 1998 141(1) :205-210. **Semiconductor Material and Characterization,**
2nd Ed. Newyork : john Wiley & Sons Inc. 1998.

Dhage, S.R., Choube, V. and Ravi, v. Nonlinear I-V characteristics of deped SnO_2 , 2004,
Mater. Sci & Eng. B 110:168-171.

วีรชัย ลิภา. 2546. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $CdS-ZnS$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเทียบเบนของรังสีเอ็กซ์ของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่ได้จากไฟล์ฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS
(The Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

Pattern : 49-1302		Radiation = 1.540598		Quality : High		
$(Cd_{0.8}Zn_{0.2})S$		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		24.836	69	1	0	0
		26.527	48	0	0	2
		28.204	100	1	0	1
		36.649	27	1	0	2
		43.738	45	1	1	0
		47.870	39	1	0	3
		50.928	8	2	0	0
		51.873	31	1	1	2
		52.654	19	2	0	1
		54.628	3	0	0	4
		58.300	3	2	0	2
		60.881	2	1	0	4
		66.839	10	2	0	3
		69.325	4	2	1	0
		70.932	7	2	1	1
		72.442	4	1	1	4
		75.529	8	1	0	5
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 135.06				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 99.56				
a = 4.13750		Dx = 4.505				
c = 6.71580						
Z = 2						
SAMPLE PREPARATION : Cd Cl ₂ , Zn Cl ₂ and thiourea were mixed in an alkaline solution, which was heated to 85 C and stirred for 30 minutes. The precipitate was filtered, dried, ground and heated at 300 C for 2 hours under nitrogen, then 800 C for 2 hours under nitrogen.						
UNIT CELL DATA : Reference reports: a=4.14, c=6.716.						
GENERAL COMMENTS : Cell parameters generated by least squares refinement.						

Pattern : 40-836		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
$Cd_{7.23}Zn_{2.77}S_{10}$		2θ	I	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide		25.502	51	1	0	0
		27.081	100	0	0	2
		28.776	43	1	0	1
		37.442	5	1	0	2
		44.833	61	1	1	0
		48.902	10	1	0	3
		52.230	2	2	0	0
		55.696	4	0	0	4
		120.554	2	3	1	3
		148.985	2	3	0	6
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 1314.43				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 93.21				
a = 4.04200		Dx = 4.683				
c = 6.58800						
Z = 0						
COLOR : Yellow						
GENERAL COMMENTS : Pigment.						
SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO ₃) ₂ containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C.						
GENERAL COMMENTS : 27.7 mole % ZnS.						
GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: a=4.131-0.00134 P; s=0.003, c=6.713-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 24-1137		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn _{0.9} Cd _{0.1} S		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Sphalerite, cadmian, syn / Zinc Cadmium Sulfide		28.466	100	1	1	1
		32.952	10	2	0	0
		47.280	50	2	2	0
		56.103	30	3	1	1
		58.808	2	2	2	2
		69.115	5	4	0	0
		76.372	10	3	3	1
		78.690	2	4	2	0
		87.989	10	4	2	2
		94.855	6	5	1	1
		106.559	3	4	4	0
		113.900	5	5	3	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 102.14				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 160.46				
a = 5.43400		Dx = 4.228				
Z = 4		V/cor = 6.40				

Pattern : 40-835		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
Cd _{0.05} Zn _{1.95} S ₁₀		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Cadmium Zinc Sulfide		25.208	89	1	0	0
		26.914	90	0	0	2
		28.587	100	1	0	1
		37.281	18	1	0	2
		44.370	76	1	1	0
		48.624	36	1	0	3
		51.847	10	2	0	0
		55.404	3	0	0	4
		118.784	3	3	1	3
		146.514	3	3	0	6
		147.575	2	3	2	1
		156.350	3	3	1	5
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 1352.99				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 94.94				
a = 4.06900		Dx = 4.733				
c = 6.62100		Z = 0				
<p>COLOR : Yellow GENERAL COMMENTS : Pigment. SAMPLE PREPARATION : Mixed sulfide of desired composition was precipitated by reaction of water solution of Cd (NO₃)₂ containing zinc ions with solution of BaS containing excess sulfur. The precipitate was filtered, dried and ground and subsequently calcined in an inert or reducing atmosphere at a minimum temperature of 400 C. GENERAL COMMENTS : 19.5 mole % ZnS. GENERAL COMMENTS : The introduction of ZnS into CdS forms a solid solution with concomitant variations of lattice constants that obey the following empirical relationship: a=4.131-0.001314 P; s=0.003, c=6.173-0.00458 P; s=0.004, where P=mole % ZnS, s=standard deviation.</p>						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 24-1136		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
Zn _{0.9} Cd _{0.1} S		2th	I	h	k	l
Wurtzite, cadmian, syn / Zinc Cadmium Sulfide		26.832	100	1	0	0
		28.383	65	0	0	2
		30.389	100	1	0	1
		39.402	40	1	0	2
		47.280	70	1	1	0
		51.502	65	1	0	3
		55.187	10	2	0	0
		56.066	45	1	1	2
		57.246	15	2	0	1
		58.683	1	0	0	4
		63.204	8	2	0	2
		65.651	1	1	0	4
		72.481	20	2	0	3
		75.586	8	2	1	0
		77.328	10	2	1	1
		78.613	2	1	1	4
		81.757	14	1	0	5
		82.524	6	2	1	2
		87.989	8	3	0	0
		91.215	18	2	1	3
		94.618	2	0	0	6
		94.855	8	3	0	2
		100.348	8	2	0	5
		100.900	4	1	0	6
Lattice : Hexagonal S.G. : P63mc (186) a = 3.84110 c = 6.28700 Z = 2		Mol. weight = 102.14 Volume [CD] = 80.33 Dx = 4.223 I/ cor = 2.90				
GENERAL COMMENTS : (002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation.						

Pattern : 3-1093		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Zn S		2th	I	h	k	l
Wurtzite / Zinc Sulfide		27.165	50	1	0	0
		28.587	70	0	0	2
		30.599	30	1	0	1
		47.835	100	1	1	0
		50.978	30			
		56.783	100	1	1	2
		72.675	10			
		76.809	30	2	1	0
		79.079	30			
		83.219	30			
		88.898	70			
		92.094	30			
		95.578	100	0	0	6
		99.401	30			
Lattice : Hexagonal S.G. : (0) a = 3.80000 c = 6.23000 Z = 2		Mol. weight = 97.44 Volume [CD] = 77.91 Dx = 4.154				
DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS. SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Pribram.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 2-563		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Cd S		2th	l	h	k	l
Greenockite / Cadmium Sulfide		25.064	80	1	0	0
		26.832	60	0	0	2
		28.587	100	1	0	1
		37.121	60	1	0	2
		43.917	90	1	1	0
		48.104	90	1	0	3
		52.230	80	1	1	2
		58.765	30	2	0	2
		66.763	60	2	0	3
		71.403	60	2	1	1
		72.675	30	1	1	4
		75.374	60	1	0	5
		80.678	40	3	0	0
		83.219	60	2	1	3
		86.907	40	0	0	6
		92.094	40	1	0	6
		96.811	30	2	2	0
		103.334	30	3	1	1
		108.024	30	2	0	6
		116.471	30	3	1	3
		141.872	20	3	2	1
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 144.47				
S.G. : P63mc (186)		Volume [CD] = 99.90				
a = 4.14200		Dx = 4.803				
c = 6.72400		Dm = 4.820				
Z = 2						
DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS 6-314. COLOR : Yellow, orange MELTING POINT : 780 OPTICAL DATA : B=2.506, Q=2.529, Sign=+ SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Bishopdown, Scotland, UK.						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายเลอพงส์ รักรธรรม เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2525 เป็นคนราชบุรีโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544

นายอภิรัตน์ มีมุขอ เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2526 เป็นคนกรุงเทพฯโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนอานวยศิลป์ พระนคร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2544



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้