

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์



นางสาวจารุทัศน์ เตชะวิจิตร
นางสาวสาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์
นายหัสพร ทองแดง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 40209
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วัน, เดือน, ปี 20 ส.ค. 2544
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


b. 11092026

Preparation and Study of Some
Properties of Cadmium Zinc Sulfide Thin Films.

Miss Charutas Tachauichitra.

Miss Sawitree Premrattanawong.

Mr. Hassaporn Thongdaeng.



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
2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์
โดย นางสาวจารุทัศน์ เตชะวิจิตรภา รหัสประจำตัว 40054006
นางสาวสาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์ รหัสประจำตัว 40054056
นายหัสพร ทองแดง รหัสประจำตัว 40054062
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

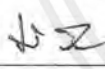
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
รศ. งามนิตย์ แก้วแดง
ผศ.ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ
ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต




(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ


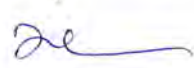
(รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

ประธานกรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ)

กรรมการ



(ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Law

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เครือวัลย์ ศีตะจิตต์)

กมลทิพย์ จินดาภิวัตน์

กรรมการ

(อาจารย์ ภูมิินทร์ จินดาภิวัตน์)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์
โดย นางสาวจรรุทัศน์ เตชะวิจิตรธา รหัสประจำตัว 40054006
นางสาวสาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์ รหัสประจำตัว 40054056
นายหัสพร ทองแดง รหัสประจำตัว 40054062

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จูนินัย แก้วแดง
รศ. งามนิตย์ แก้วแดง
ผศ.ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ
ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ
ภาววิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของผลึกพหุพันธ์ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ($x \leq 0.8$) จากสารละลายโดยเคลือบบนกระจกสไลด์ซึ่งสารตั้งต้นประกอบด้วย $CdSO_4$, $ZnSO_4$, NH_3 และ $SC(NH_2)_2$ เตรียมที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นนำไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ C$ นานประมาณ 20 นาที จากการศึกษา การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ไม่มีการแอนนัลจะปรากฏพีคเนื่องจากการเลี้ยวเบนของระนาบ (111), (220) และ (311) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แต่เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงกว่า $400^\circ C$ จำนวนพีคของการเลี้ยวเบนจะเพิ่มขึ้น และ สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้ว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนผสม $x = 0.4$ มีค่าประมาณ 100 nm และขนาดของเกรนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น องค์ประกอบของฟิล์มบางสามารถหาได้จากวิธี EDS ส่วนขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล อีกทั้งการตอบสนองต่อแสงจะลดลงทั้งในขณะที่ยุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นหรืออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation and Study of Some Properties of Cadmium Zinc Sulfide Thin Films

Name Miss Charutas Tachavichitra
Miss Sawitree Premrattanawong
Mr. Hassaporn Thongdaeng

Special Project Advisor Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang
Assoc.Prof. Ngamnit Gaewdang
Assist.Prof.Dr. Tiparatana Wongcharoen
Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat

Department Applied Physics Faculty of Science

Academic Year 2000

Abstract

In this research, polycrystalline thin films of $Cd_{1-x}Zn_xS$ ($x \leq 0.8$) were deposited on slide glass substrates in an aqueous solution containing of $CdSO_4$, $ZnSO_4$, NH_3 and $SC(NH_2)_2$ about 60 minutes at $80^\circ C$. The as-deposited films were exposed to a stream with slowly flow of nitrogen at annealing temperature ranging $100-500^\circ C$ about 20 minutes. X-ray diffraction patterns of as-deposited $Cd_{1-x}Zn_xS$ thin films show three peaks corresponding to (111), (220) and (311) of zincblende structure. However, X-ray diffraction characteristics of wurtzite structure were appeared at annealing temperature above $400^\circ C$. From scanning electron microscope, the grain size of as-deposited films with $x=0.4$ about 100 nm was observed and it was seemly increased by the enhancement of annealing temperature. The compositions of thin films were determined by EDS technique. The evolution of energy gap and sheet resistance as functions of annealing temperature were investigated. Finally, the decrease of photoresponse as functions of both annealing temperature and mixture ratio were also observed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิธย์ แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดี ตลอดมา

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันท์ รัตนธรรมพันธ์ แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิค การเตรียมฟิล์มบางสารตัวอย่าง รวมทั้งอนุเคราะห์ห้องน้ำปรับอุณหภูมิได้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพปฎล สุทธิศิริ อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิง จุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) และ EDS ในการศึกษา ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาควัดความหนาฟิล์มบางและวิเคราะห์อะตอมต่างๆ จากฟิล์ม บาง

ขอขอบคุณ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้ เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ต และ ย่านตามองเห็นได้ (UV-VIS) ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้ใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้อง จุลทรรศน์กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ และ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่
อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่
อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้อุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจ
ตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค	4
2.1 ชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติ	4
2.2 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของผลึกในอุดมคติ	5
2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	6
2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	9
2.3 ดัชนีมิลเลอร์	12
2.3.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	12
2.3.2 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค	13
2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง (real crystal)	14
2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี	15
2.4.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	15
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	17
2.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	17
2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	18
2.5.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	18
2.5.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	23
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope:SEM)	24
2.6.1 สัญญาณอิเล็กตรอน	24
2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร	27
2.6.3 เทคนิคการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณภาพ	29
2.6.4 ระบบภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	32
2.7 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	36
2.8 การศึกษาสเปกโตรสโคปีของการแจกแจงพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ได้จาก อะตอมของธาตุต่างๆ (Energy Dispersive Spectroscopy:EDS)	37
บทที่ 3 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	39
3.1 การเกิดสีของผลึก	39
3.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสง ของอิเล็กตรอน	43
3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	
3.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	48
3.5 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ CdS	50
3.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	51
บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้า	53
4.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล	53
4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	54
4.2.1 วิธีวัดโดยตรง	54
4.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว	55
4.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	55
4.2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีการเคลือบด้วยการ	
อาบสารละลายเคมี	60
5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	60
5.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์	60
บทที่ 6 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	62
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์	62
6.2 การเตรียมแผ่นรองรับ	64
6.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์	64
6.3.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	66
6.3.2 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ที่เตรียมได้	67
6.3.3 ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ	68
6.4 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	
6.5 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่าย SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS	71
6.6 ผลการศึกษากการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	76
6.7 วิธีการทดลองและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น	82
6.7.1 อุปกรณ์	82
6.7.2 วิธีการทดลอง	82
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	89
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	92
ภาคผนวก	94
ประวัติผู้เขียน	100
เอกสารอ้างอิง	101

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 6.1	แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม $Cd_{1-x}Zn_xS$ ด้วยวิธีการ อาบสารละลายเคมี ในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 ml	63
ตารางที่ 6.2	แสดงค่าโมลเปอร์เซ็นต์ (mole percent) ของอะตอมของธาตุ Zn ที่ถูกเจือเข้าไปในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $X=0.2, 0.4,$ 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้ บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสามารถ คำนวณหาได้จากเทคนิค EDS	75
ตารางที่ 6.3	แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางตระกูล Zn 40 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกและมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	80
ตารางที่ 6.4	แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (หน่วยเป็น eV) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่อัตราส่วนผสม (x) และที่อุณหภูมิแอนนีกที่ค่าต่างๆ	81
ตารางที่ 6.5	แสดงความต้านทานแผ่นขณะไม่ได้ฉายแสง และขณะมีการ ฉายแสงของฟิล์มบางที่อัตราส่วนผสมค่าต่างๆ โดยไม่ได้แอนนีก	88
ตารางที่ 6.6	แสดงความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางขณะไม่ได้ฉายแสง และขณะมี การฉายแสงที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแอนนีกของฟิล์มบางที่มี อัตราส่วนผสม $x=0.4$	88

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 2 มิติ	5
ก. แบบออร์เตอร์หรือแบบออร์เตอร์ระยะยาว	
ข. แบบดิสมออร์เตอร์	
ค. แบบออร์เตอร์ระยะสั้น	
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	7
รูปที่ 2.3 แสดงพันธะเตตระฮีดรอนซึ่งเป็นแบบปิรามิดรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าและพันธะโควาเลนต์	7
รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมตามระนาบต่างๆ ในโครงสร้างผลึกแบบเฟลเซนเตอร์คิวบิก	8
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	8
รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยเซลล์พื้นฐานของระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบรอนโบฮีดรอน ในโครงสร้างผลึกแบบเฟลเซนเตอร์คิวบิก	9
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ที่จัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	10
รูปที่ 2.8 แสดงหน่วยเซลล์พื้นฐานของระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	10
รูปที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมตามระนาบต่างๆ ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	11
รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงอะตอมในพันธะเตตระฮีดรอน	11
ก. การจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ที่จัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล	
ข. การจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	
รูปที่ 2.11 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	12
รูปที่ 2.12 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค	13
รูปที่ 2.13 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซีชนิดขดกึ่งและชนิดเฟรนเคิล	15
รูปที่ 2.14 แสดงเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน	16
รูปที่ 2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	18

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ซึ่งมีไอออนของธาตุ Cs ⁺ อยู่ที่ ตำแหน่ง 000 และมีไอออนของธาตุ Cl ⁻ อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ ตามลำดับ	20
รูปที่ 2.17 แสดงรั้วความเข้มที่ปรากฏบนฟิล์มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกอัลลอยด์ CuZn เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบ (ก) ดิสออร์เดอร์ เมื่อ $T > T_c$ (ข) ออร์เดอร์ เมื่อ $T < T_c$	21
รูปที่ 2.18 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึก (ก) KCl (ข) KBr	22
รูปที่ 2.19 สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในลักษณะต่างๆ ของอันตรกิริยา	25
รูปที่ 2.20 แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นสารตัวอย่าง	27
รูปที่ 2.21 รังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุ	29
รูปที่ 2.22 แสดงระบบการถ่ายภาพขยายขนาดไมโครในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยฉากเรืองรังสี	30
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทฤษฎีเป็นสัญญาณภาพ	30
รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กระเจิงกลับเป็นสัญญาณภาพ	31
รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณภาพ	31
รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านแบบสแกน	32
รูปที่ 2.27 กลุ่มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน	33
รูปที่ 2.28 การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบอิเล็กทรอนิกส์ส่องผ่าน	34
รูปที่ 2.29 การสแกนโฟรบอิเล็กทรอนิกส์บนผิวชิ้นสารตัวอย่าง	35
รูปที่ 2.30 การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน	36
รูปที่ 2.31 แสดงแผนภาพเบื้องต้นของระบบต่างๆ ภายนอกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์	37
รูปที่ 2.32 การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนที่ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ K_{α} และ K_{β}	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ ที่เป็นอินทรีนิก	40
ก. ฉนวน	
ข. สารกึ่งตัวนำ	
ค. ตัวนำ	
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการส่งผ่านของแสงในฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนา เท่ากับ d	42
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของ อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0\text{ K}$)	44
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับ พลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0\text{ K}$)	45
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิด กระบวนการสร้างโฟนอน	
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึก แบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิง ระหว่างสปิน-ออร์บิต	46
รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างลักษณะสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึก แบบเวิร์ทไซต์ โดยไม่คิดการคัปปลิง ระหว่างสปิน-ออร์บิต	47
รูปที่ 4.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว	55
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นแบบสี่ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง	55
รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d	56
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	57
ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง	
ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด	
รูปที่ 4.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.1 แสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางของ MS (เมื่อ M=Cd และ/หรือ Zn บนแผ่นรองรับ)	61
รูปที่ 6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์	63
รูปที่ 6.2 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยการเคลือบ 3 ครั้ง	66
รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับที่เตรียมได้	67
รูปที่ 6.4 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	68
รูปที่ 6.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100 - 500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	70
รูปที่ 6.6 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $100 - 500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	70
รูปที่ 6.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	71
รูปที่ 6.8 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัล และใช้กำลังขยาย 60,000 เท่า	72
รูปที่ 6.9 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที และใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า	72
รูปที่ 6.10 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และใช้กำลังขยาย 60,000 เท่า	73
รูปที่ 6.11 แสดงการวัดความหนาด้วยการถ่ายภาพ SEM ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนัล	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.12 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของอะตอมของ แต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มบาง $Cd_xZn_{1-x}S$ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์	74
รูปที่ 6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่าเท่ากับ 400-1000 nm ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีสล และมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	76
รูปที่ 6.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของเป็นฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อไม่มีการแอนนีสล	77
รูปที่ 6.15 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	78
รูปที่ 6.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	78
รูปที่ 6.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	79
รูปที่ 6.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ พลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	79

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	80
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิแอนนีกัล	81
รูปที่ 6.21 แสดงการวัดหาค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	82
รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนีกัล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง	84
รูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนีกัลแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm ²	85
รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีกัลของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm ²	86
รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอัตราส่วนผสม (x) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อมีการแอนนีกัลที่ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm ²	87

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยที่สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารชนิดนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญที่สุดคือสามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ แสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนและโลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้นำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรรวม ตัวตรวจจับแสง และเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแห่งใหม่ที่มีความสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบชัลโคไพไรต์ (chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่อยู่ในรูปของรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของสาร $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2/\text{Mo}/\text{sodalime glass}$ ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 17.7%[1]

ฟิล์มบาง CdS และ ฟิล์มบาง ZnS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง (direct band gap) และมีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ค่อนข้างกว้าง โดย CdS มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.40 eV ส่วน ZnS มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.7 eV รวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อมีแสงตกกระทบ ดังนั้นฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง ZnS จึงเหมาะที่จะนำมาทำเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ผลึก CdS และ ZnS จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในโครงสร้างผลึกระบบคิวบิก (cubic) หรือเวิร์ทไซต์ (wurtzite) ซึ่งจัดอยู่ในโครงสร้างผลึกระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) อะตอมของ Zn สามารถเข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd ในโครงผลึกได้ และเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ โดยที่ $0 \leq x \leq 0.8$ สารละลายของแข็ง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ นี้จะมีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 2.4-3.7 eV [2] ดังนั้นถ้ามีการแทนที่ CdS ด้วย $(\text{Cd,Zn})\text{S}$ จะทำให้ได้เซลล์

แสงอาทิตย์ที่ดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [1,3]

การเตรียมฟิล์มบางของ CdS หรือ ZnS มีด้วยกันหลายวิธีเช่น สเป็ตเตอริง (sputtering), การระเหยสารในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation), การเคลือบโดยวิธีไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition:CVD), สเปรย์ไพโรไลซิส(spray pyrolysis) และการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition:CBD) เป็นต้น ซึ่งการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{S}$ โดยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้น [1-8] เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่ประกอบด้วย $\text{Cd}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$ กับ S^{2-} ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นฟิล์มบาง $(\text{Cd,Zn})\text{S}$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) ที่ใช้อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 100°C และสามารถเตรียมฟิล์มให้มีขนาดใหญ่ตามต้องการได้ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่มากนัก จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

วัตถุประสงค์และขั้นตอนดำเนินงาน

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยการอบสารละลายเคมีและนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที
2. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและทำการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)
4. เพื่อศึกษาทั้งสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณขององค์ประกอบของอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนกระจกสโลต์ด้วยวิธีสเปกโตรสโคปีของการแจกแจงพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากอะตอมของธาตุต่าง ๆ (Energy Dispersive Spectroscopy: EDS)
5. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบางเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการดำเนินงานมีดังนี้

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีออบสารละลาย พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงการพิเศษ
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์โดยการให้ x เท่ากับ 0, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 โดยวิธีออบสารละลายเคมีพร้อมทั้งหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีมีความหนาสม่ำเสมอและติดแน่นดีกับกระจกสไลด์ จากนั้นจึงนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนไปของฟิล์มบาง
3. ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
5. ศึกษาทั้งสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณขององค์ประกอบของอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ด้วยวิธี EDS
6. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
7. วัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษนี้คือ ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยวิธีการออบสารละลายเคมีที่ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแบบรอยต่อวิวิธพันธ์ของสาร $MgF_2/ZnO/Cd_{1-x}Zn_xS/Cu(InGa)Se_2/Mo/Sodalime\ glass$ ซึ่ง $Cd_{1-x}Zn_xS$ นี้ มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงและมีค่าช่องว่างแถบพลังงานตามต้องการได้ในช่วงประมาณ 2.4-3.7 eV

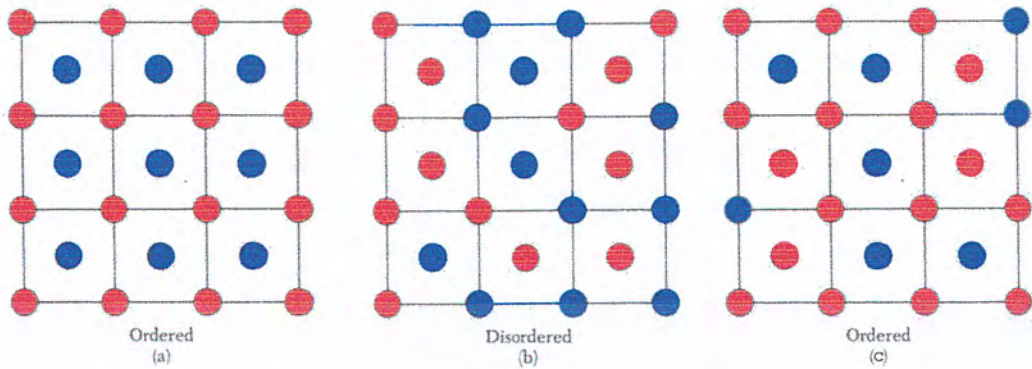
บทที่ 2

โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาค

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึก (crystal structure) ที่แตกต่างกันขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก (lattice) นั้น การมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น การนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสง และความแข็ง เป็นต้น

2.1 ชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติ [4,9]

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิสคือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกนั้น เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติแบบเป็นระเบียบซ้ำซ้อนกัน หรือแบบเป็นคาบ (periodic) ในระยะยาวอนันต์เมื่อเทียบกับค่าคงที่โครงผลึกจะเรียกการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ว่าแบบออร์เดอร์ระยะยาว หรือแบบออร์เดอร์ (long range ordered) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ก สารที่อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบนี้ได้แก่ ผลึกในอุดมคติ (ideal crystal) หรือผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal) และอัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0$ K) เป็นต้น ถ้ามีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติ แบบเปิดตำแหน่ง หรือแบบไม่เป็นคาบจะเรียกว่าการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ว่า แบบดิสออร์เดอร์ (disordered) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ข. สารที่อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบนี้ได้แก่ อัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิ $T > T_c$ และผลึกจริงหรือผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนถ้ามีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติแบบเป็นคาบ ในระยะสั้นเมื่อเทียบกับค่าคงที่โครงผลึกจะเรียกการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ว่าแบบออร์เดอร์ระยะสั้น (short range ordered) ดังแสดงในรูปที่ 2.1ค. สารที่อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบนี้ ได้แก่ อัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิ (T) น้อยกว่าค่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส (T_c) อะมอร์ฟัสและผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกที่ไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 2 มิติ

- ก. แบบออร์เดอร์หรือแบบออร์เดอร์ระยะยาว
- ข. แบบดิสออร์เดอร์
- ค. แบบออร์เดอร์ระยะสั้น

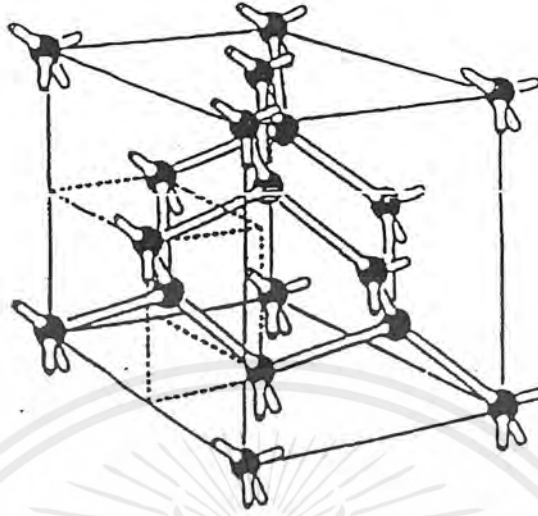
2.2 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของผลึกในอุดมคติ [4,9]

ผลึกในอุดมคติเป็นผลึกสมบูรณ์จะมีการจัดเรียงอะตอมในแบบเป็นระเบียบซ้ำซ้อนกันหรือเป็นแบบคาบ ในระนาบหนึ่งเมื่อเทียบกับค่าคงที่โครงผลึกภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติ ซึ่งเราเรียกการจัดอะตอมแบบนี้ว่าแบบออร์เดอร์ หรือแบบออร์เดอร์ระยะยาวและมีการสมมาตรทั้งแบบเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (translational symmetry) และการสมมาตรแบบจุด (point operation symmetry) ซึ่งได้แก่การสมมาตรแบบหมุนรอบแกนสมมาตร (rotation symmetry) การสมมาตรแบบกระจกสะท้อน (mirror reflection operation symmetry) และการสมมาตรแบบอินเวอร์ชัน (inversion operation symmetry) เป็นต้น ซึ่งทำให้สามารถจัดเป็นระบบโครงสร้างผลึกได้มากมายได้แก่ แบบคิวบิกอย่างง่าย (simple cubic:sc) แบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก (body center cubic:bcc) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face center cubic:fcc) แบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close pack: hcp) แบบเพชร (diamond structure) แบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แบบเวิร์ทไซต์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ต่อไป

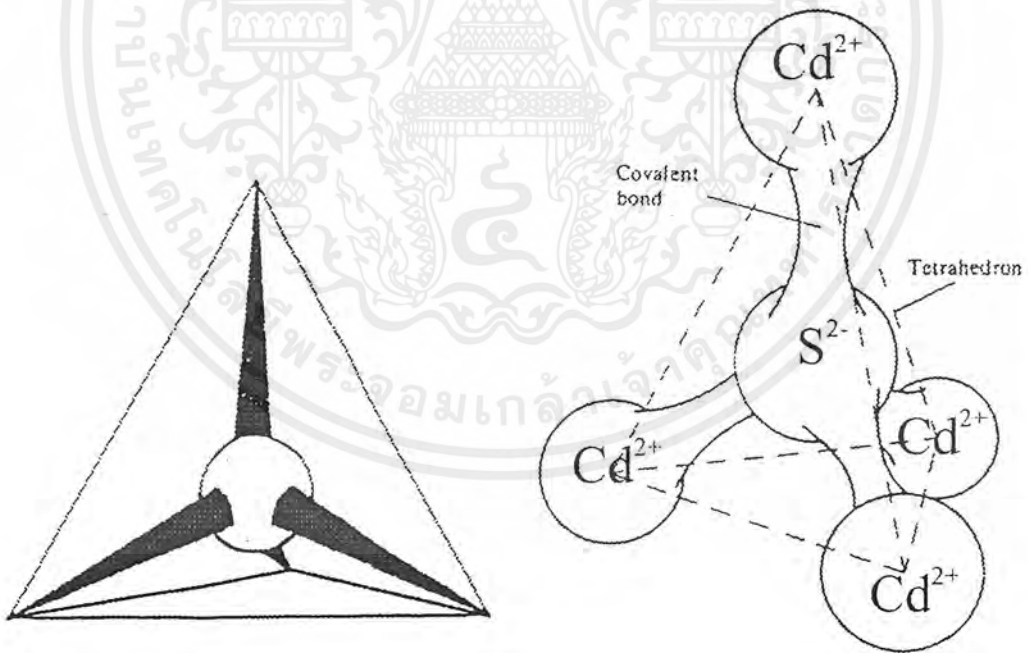
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [4, 9-11]

โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิกสองโครงสร้างมาซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุม โดยที่โครงสร้างผลึกหนึ่งจะอยู่ที่ตำแหน่ง $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของอีกโครงสร้างผลึกหนึ่ง โครงสร้างผลึกแบบเพชรประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงชนิดเดียวอยู่ที่ตำแหน่ง (000) $(0\frac{1}{2}\frac{1}{2})$ $(\frac{1}{2}0\frac{1}{2})$ $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}0)$ $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$ $(\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4})$ $(\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4})$ $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4})$ ตามลำดับดังแสดงในรูป 2.1 หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) มี 8 อะตอมมีอะตอมเพื่อนบ้าน (nearest neighbor) อยู่ 4 อะตอม หรือมีโคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ (coordination numbers) เท่ากับ 4 จึงมีความแข็งแรงและมีจุดหลอมเหลวสูงมาก มีพันธะเคมีของโมเลกุลระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของกลุ่มพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC..... หรือ 012012..... ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก หรือแบบรอมโบฮีดรอน (rhombohedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะมีความแตกต่างกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือเป็นโครงสร้างผลึกที่ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดโดยมีอะตอมของ Zn อยู่ที่ตำแหน่ง (000) $(0\frac{1}{2}\frac{1}{2})$ $(\frac{1}{2}0\frac{1}{2})$ $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}0)$ และอะตอม S อยู่ที่ตำแหน่ง $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4})$ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชร สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งมีสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

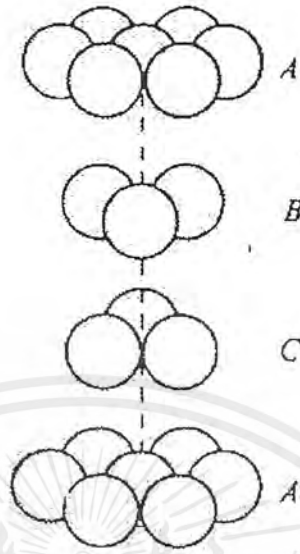


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์

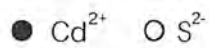
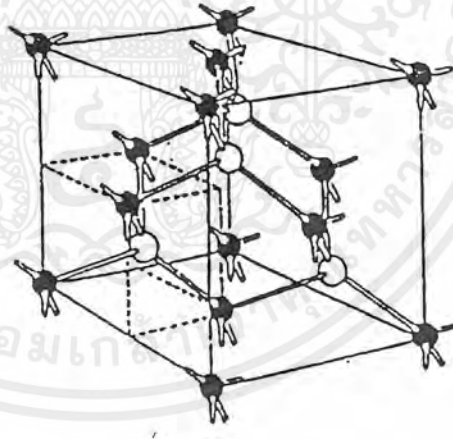


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเป็นแบบปิรามิดรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า
และพันธะไอออนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

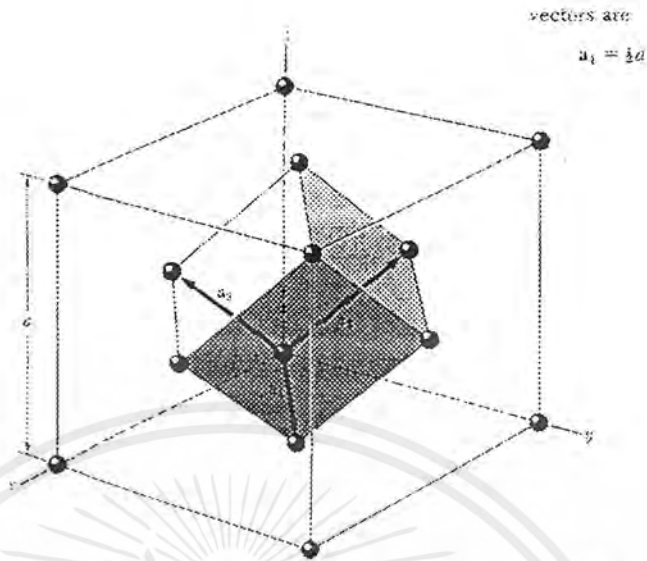


รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมตามระนาบต่างๆ ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

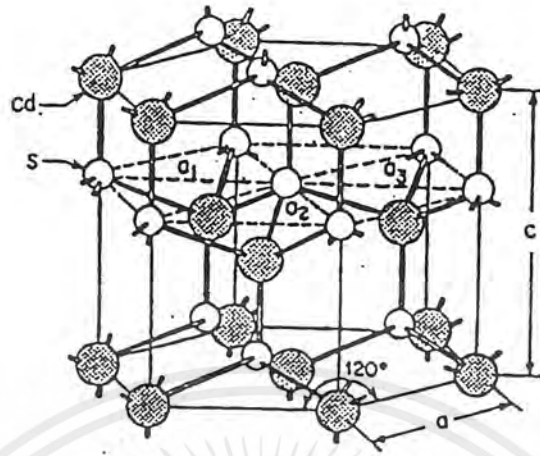
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



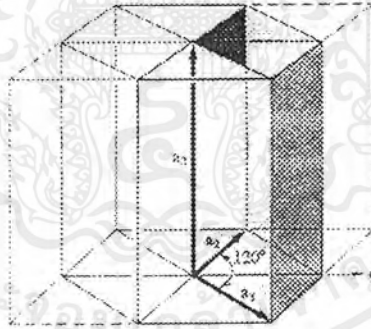
รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยเซลล์พื้นฐานของระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบรอนโบฮีดรอน ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (บริเวณที่แรเงา)

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ที่จัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล [4, 9-11]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกับเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c-axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมหรือมีโคออร์ดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 4 มีพันธะเคมีของโมเลกุลระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนของอะตอม คล้ายโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกันคือ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ขในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB....ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หรือ 0101..... ดังแสดงในรูปที่ 2.10ก ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABCABC..... ดังแสดงในรูปที่ 2.4 หรือ 012012..... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น

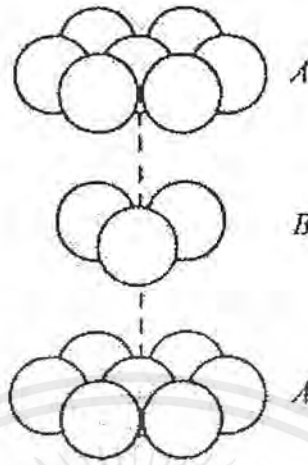


รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวรีทไซต์ที่จัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบ
เฮกซะโกนอล



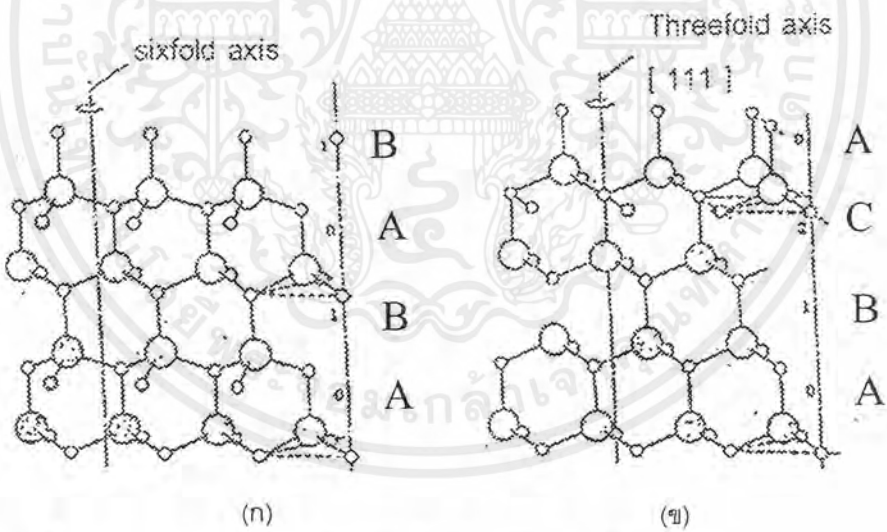
รูปที่ 2.8 แสดงหน่วยเซลล์พื้นฐานของระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล
(บริเวณที่แรเงา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมตามระนาบต่างๆ ในโครงสร้างผลึกแบบ

เฮกซะโกนอล



รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงอะตอมในพันธะเตตระฮีดรอน

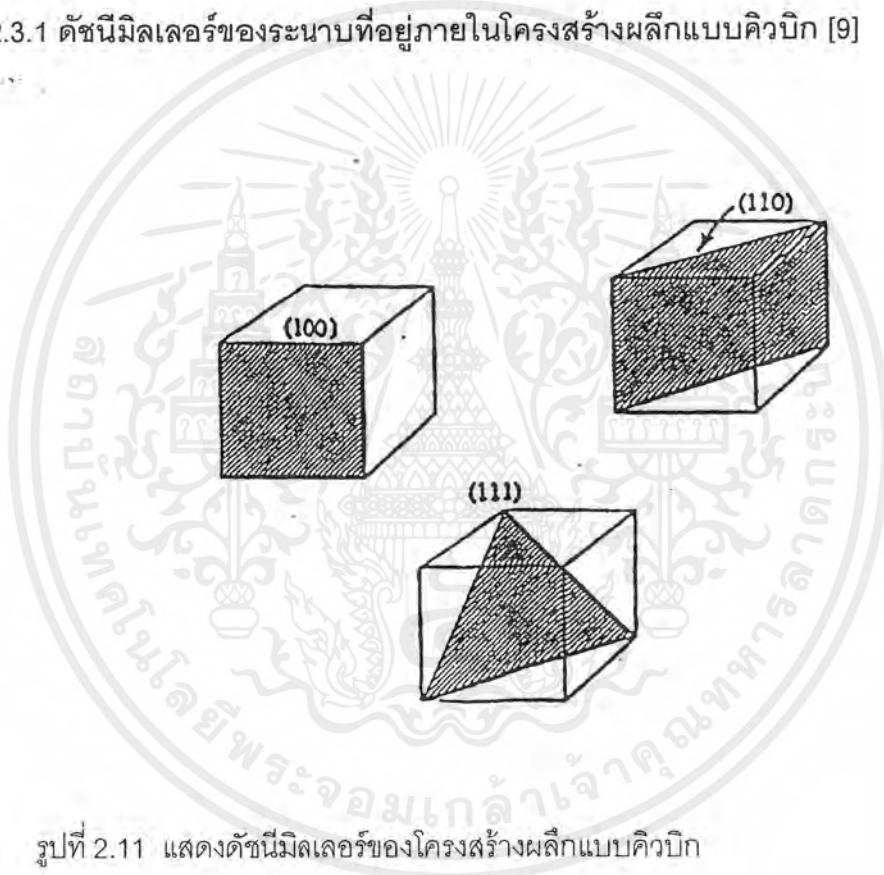
- ก. การจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล
- ข. การจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ดัชนีมิลเลอร์ [4, 9-11]

การบอกชื่อระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้น จะบอกเป็นค่าดัชนีมิลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน (ทำโดยการหาค.ร.น.ก่อน) ผู้เสนอคือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยแยกการพิจารณาดัชนีมิลเลอร์เป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ

2.3.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [9]



รูปที่ 2.11 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

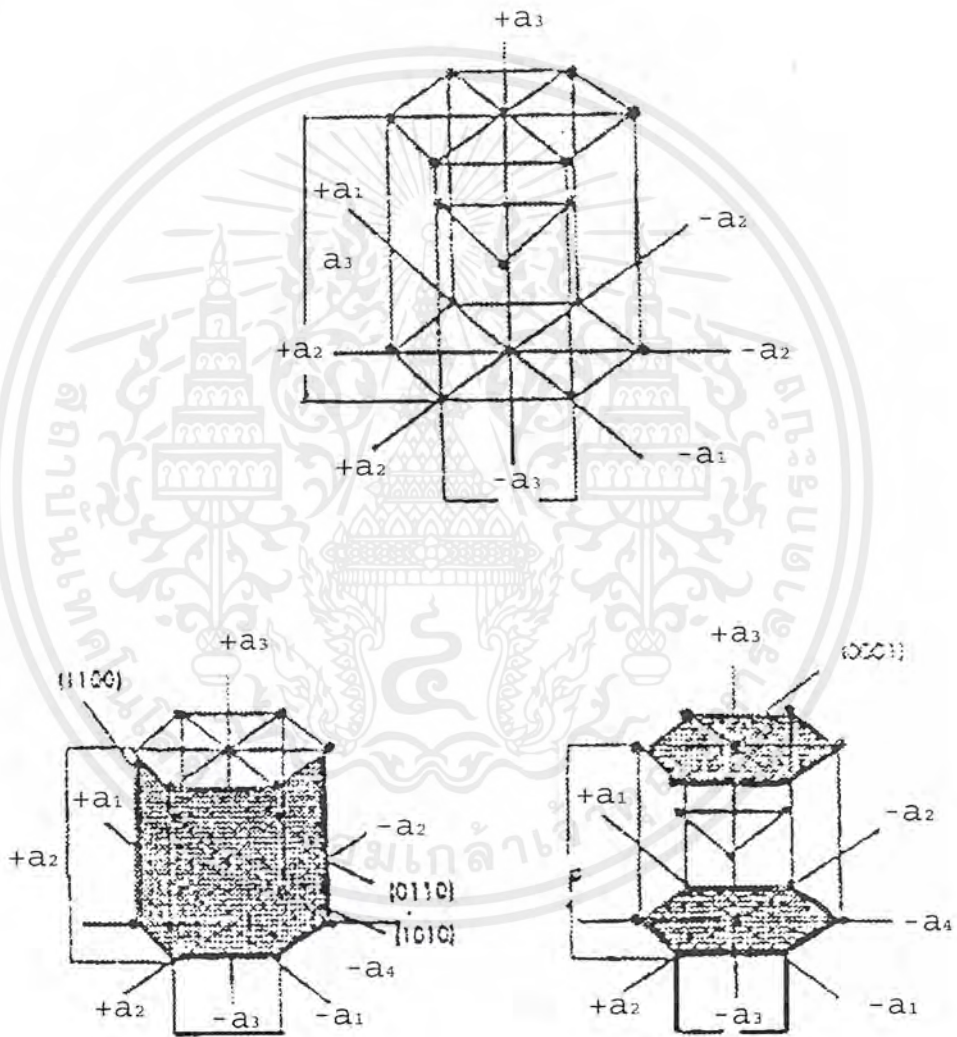
การบอกชื่อระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะบอกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (h, k, l)

$$h:k:l = 1/p : 1/q : 1/r \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ p, q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั่นคือ h, k, l จะเป็นเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือ ดัชนีมิลเลอร์

2.3.2 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค



รูปที่ 2.12 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงสร้างผลึกแบบเอ็กซะโกนอล โคสแพค ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบ คือ ดัชนีมิลเลอร์ บราวเอใช้สัญลักษณ์ h,k,l ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 และ a_4 ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับ ดังรูปที่ 2.12 กล่าวคือ ระนาบฐานมี 2 ระนาบคือระนาบฐานบน และระนาบฐานล่าง แกน a_1, a_2, a_4 เป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐาน ทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัวแกน $a_1 = a_2 = a_4 = a$ และแกนที่ 4 คือ แกน a_3 เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้งสอง ตัวอย่างเช่นถ้ามีระนาบตัดแกน a_3 ที่ระยะ 1 หน่วย และขนานหรือไม่ตัดแกน a_1, a_2, a_4 นั่นคือ จะมีอัตราส่วนของจุดตัดแกนต่างๆ เป็น $(\frac{1}{\infty} \frac{1}{\infty} \frac{1}{\infty} \frac{1}{1})$ ดังนั้นจึงมีดัชนีมิลเลอร์บราวเอเป็น (0001) แต่เมื่อพิจารณาถึงการสมมาตรของรูปทรงปริซึมของโครงสร้างผลึกแบบเอ็กซะโกนอล โคสแพค และได้หน่วยเซลล์พื้นฐานของระบบโครงสร้างผลึกเป็นแบบเอ็กซะโกนอลที่มีแกน $a_1 = a_2 \neq a_3$ ดังรูปที่ 2.8 จึงนิยมใช้ดัชนีมิลเลอร์เพียง 3 ค่า คือ (hkl) ที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับสำหรับบอกชื่อระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเอ็กซะโกนอล

2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง (real crystal) [4, 9]

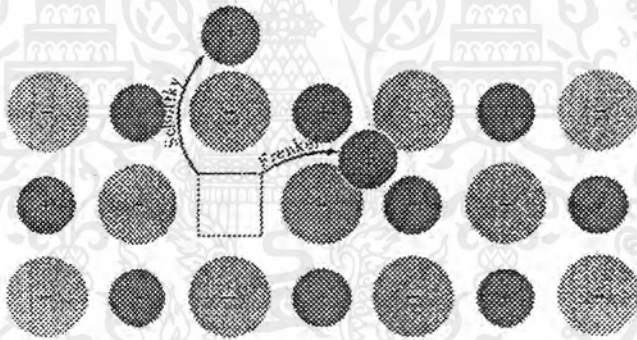
ผลึกจริงเป็นผลึกไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึก (defect crystal) เกิดขึ้นทำให้คุณสมบัติการสมมาตรดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1 เกิดขึ้น ในช่วงระยะสั้น เมื่อเทียบกับค่าคงที่โครงสร้างผลึก คือมีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบออร์เดอร์ระยะสั้น หรือแบบดีสออร์เดอร์ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกมีหลายชนิด เช่นข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวกแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงสร้างผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซับสติติวชันนัล (substitutional defect) คือข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) คือข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงสร้างผลึก เป็นต้น ข้อบกพร่องแบบเชิงเส้น (line defect) เช่นสลิป (slip) ซึ่งก็คือข้อบกพร่องผลึกที่มีระนาบของอะตอมเลื่อนไป ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) ซึ่งก็คือข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีระนาบสลิป (slip planes) ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของสลิป (slip direction) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) ซึ่งก็คือข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีระนาบสลิปมีทิศทางขนานกับทิศทางของการไหลของสลิป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries) และทวิน (twin) อีกด้วย ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี เกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน ต่อไป

2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี [4,9]

ข้อบกพร่องแบบแวแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุดซึ่งคือข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอม หรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึกแบ่งเป็นสองชนิด คือข้อบกพร่องผลึกชนิดชอตที้ (Schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอม หรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้า (surface) ของโครงผลึก และข้อบกพร่องผลึกชนิดเฟรนเคิล (Frenkel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของดังแสดงในรูปที่ 2.13

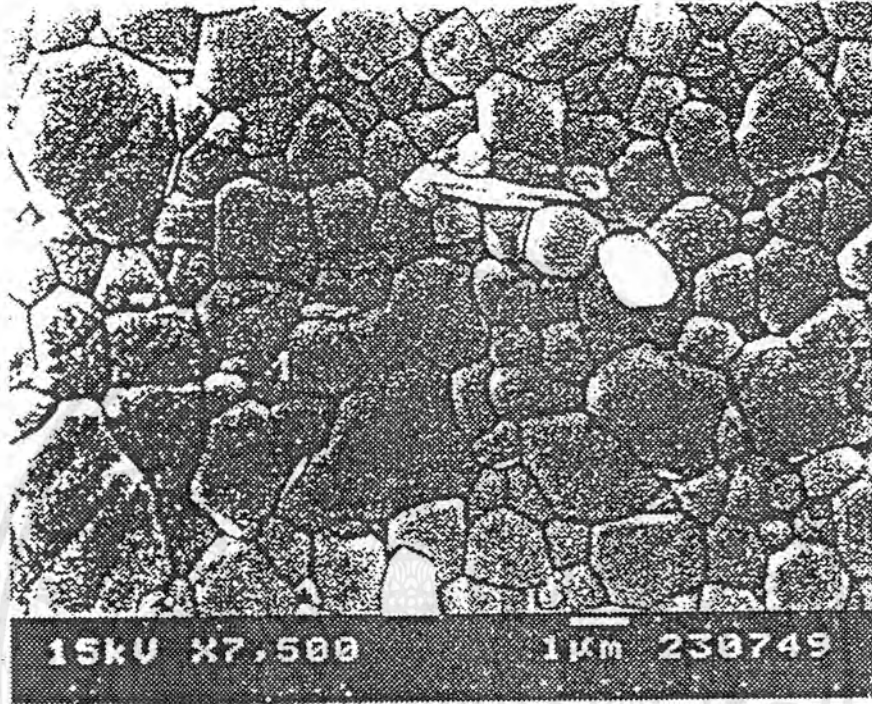


รูปที่ 2.13 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซีชนิดชอตที้และชนิดเฟรนเคิล

2.4.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน [4, 9]

เกรนคือ บริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัว (orientation) ในทิศทางเดียวกันและแนวพรมแดนระหว่างเกรนต่างๆ ที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกในทิศทางแตกต่างกัน เรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลึกที่มีเกรนเดียว (single grain) จะเรียกว่าผลึกเดี่ยว หรือผลึกเอกพันธ์ (single crystalline) ผลึกที่มีหลายเกรน เรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (poly crystalline) เกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆไปจากกรณีผลึกในอุดมคติ ได้แก่ ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการ

สกัดกั้นการไหลของกระแส หรือถ้าขอบเขตรอยต่อของเกรนก็ก่อดอมโมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.14 แสดงเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

2.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [4, 9]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-2 Å ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีอันตรกิริยากับสสารน้อยมาก มีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค คือเป็นการพิจารณาในระดับการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึก เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq a$ หรือที่มีค่าความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (interatomic spacing) คือให้ $\lambda \approx 10^{-8}$ cm หรือ $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ หรือที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าสองเท่าของระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (distance of planes) คือให้ $\lambda \leq 2d$ ดังรูปที่ 2.15 ตกกระทบผลึกที่ทำหน้าที่เป็นเกรตติ้ง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึกแบบมีเฟสตรงกัน (in phase) แล้วจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มที่รองรับ แต่ถ้าเป็นชุดอุปกรณ์แบบดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometers) ก็จะมีหัววัดซินทิลเลชันเคาน์เตอร์ (scintillation counters tubes) หรือพรอพเพอร์ชันนัลเคาน์เตอร์ (proportion counter tube) ที่ใช้สำหรับตรวจวัดความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากผลึก ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อแบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า "กฎของแบรกก์" ขึ้นดังสมการ

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

โดยที่

$$\lambda(\text{Å}) = \frac{12.4}{\epsilon(\text{keV})}$$

$$\epsilon = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

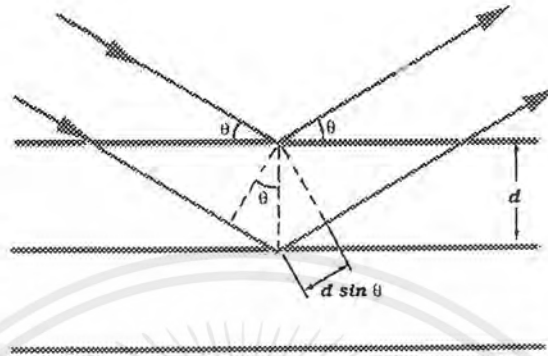
θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

n คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3.....

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (plank constant) = 6.62×10^{-27} erg sec
= 6.62×10^{-34} J sec

1 eV = 1.6×10^{-19} J , 1 Å = 10^{-8} cm = 10^{-10} m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ โดยจากพิจารณาดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก [4,9]

เราสามารถหาที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่างๆ ของโครงสร้างผลึกได้จากสมการ

$$S(hkl) = \sum_j f_j \exp[-i2\pi(x_j h + y_j k + z_j l)] \quad (2.3)$$

โดยที่ $S(hkl)$ = ค่าแฟคเตอร์โครงสร้าง (structure factor)

x_j, y_j, z_j = ตำแหน่งของอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ตำแหน่ง y_j

(hkl) = ดัชนีมิลเลอร์

$I = |S(hkl)|^2 = S(hkl)S^*(hkl)$ = ค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

f_j = อะตอมมิกฟอร์มแฟคเตอร์ (atomic form factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $f_j = \int dV n_j(\rho) \exp(-iG \cdot \rho)$

เมื่อ $\rho = \gamma - \gamma_j$ = เวกเตอร์ลัพธ์ของอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ตำแหน่ง γ_j เทียบกับอะตอมที่อยู่ตำแหน่ง γ ใดๆ

γ_j = เวกเตอร์ที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดศูนย์กลางของอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ตำแหน่ง γ_j

$n_j(\rho)$ = ฟังก์ชันความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ตำแหน่ง γ_j ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอะตอมที่อยู่ตำแหน่ง γ ใดๆ

G = เวกเตอร์รีซิโปกอลแลททิซ (reciprocal lattice vector)

โดยที่ $G = hA + kB + lC$

เมื่อ A, B, C = รีซิโปกอลแลททิซ (reciprocal lattice)

V = ปริมาตรทั้งหมดของหน่วยเซลล์ (unit cell)

พิจารณาผลึกอัลลอยด์ CuZn ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบออร์เดอร์ และดิสออร์เดอร์ตามลำดับ โดยมีอะตอมของธาตุ Cu อยู่ที่ตำแหน่ง 000 และอะตอมของธาตุ Zn อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ จากสมการที่ 1 จะได้ว่า

กรณีที่ 1 : เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์ :

$$\langle s(hkl) \rangle = \langle f \rangle + \langle f \rangle e^{-i\pi(h+k+l)} \quad (2.4)$$

เนื่องจากภายในโครงผลึกของ CuZn จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุ Cu และของธาตุ Zn ที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบสุ่ม ดังนั้น

$$\langle f \rangle = \frac{1}{2}(f_{Cu} + f_{Zn}) \quad (2.5)$$

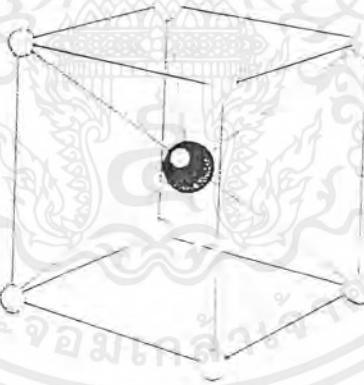
เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 2 จะได้ว่า $\langle S(hkl) \rangle = 0$; $h + k + l =$ เป็นเลขคี่ ด้วยเหตุนี้จึงไม่ปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกที่ค่า $h + k + l =$ เลขคี่ แต่ที่ค่า (hkl) นอกเหนือจากนั้นจะปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.17a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

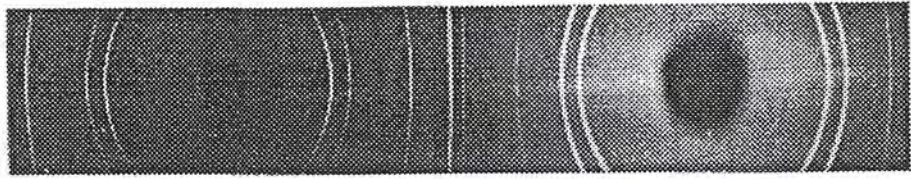
กรณีที่ 2 : เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบออร์เดอร์ :

$$S(hkl) = f_{\text{Cu}} + f_{\text{Zn}} e^{-i\pi(h+k+l)} \quad (2.6)$$

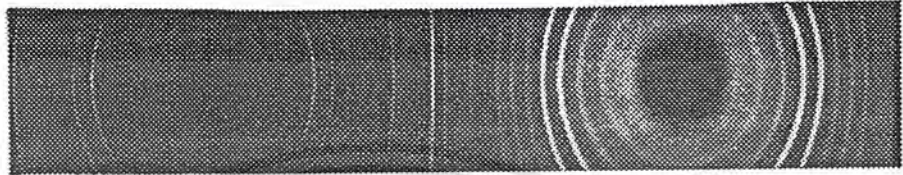
เนื่องจากภายในโครงสร้างผลึกของ CuZn จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุ Cu และ Zn แบบเป็นคาบในระยะยาว ดังนั้น $f_{\text{Cu}} \neq f_{\text{Zn}}$ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 4 จะได้ว่า $S(hkl) \neq 0$ ด้วยเหตุนี้จึงปรากฏที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทุกทิศทางที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.17b เรียกว่าเส้นเอ็กซ์ตร้า หรือเส้นซูเปอร์สตรัคเจอร์ (extra line หรือ superstructure lines) จึงเป็นการแสดงว่า การจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในลักษณะต่างๆ จะมีผลทำให้ปรากฏจำนวนที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์จะทำให้ปรากฏจำนวนที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกน้อยกว่าแบบออร์เดอร์



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ซึ่งมีไอออนของธาตุ Cs^+ อยู่ที่ ตำแหน่ง 000 และมีไอออนของธาตุ Cl^- อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ ตามลำดับ



(a)



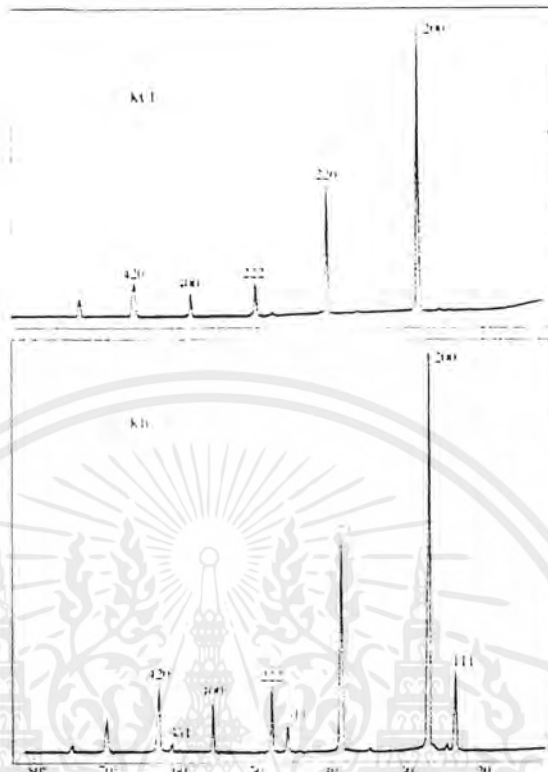
(b)

รูปที่ 2.17 แสดงรั้วความเข้มที่ปรากฏบนฟิล์มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกอัลลอยด์ CuZn เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบ

(ก) ดิสออร์เดอร์ เมื่อ $T > T_c$

(ข) ออร์เดอร์ เมื่อ $T < T_c$

นอกจากนี้การปรากฏที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของโครงผลึกยังขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอม หรือกลุ่มของอะตอมที่เรียกว่า เบสิสที่อยู่ในโครงผลึกนั้น การกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ตำแหน่งของนิวเคลียส ตำแหน่งของระนาบของอะตอมตลอดจนจำนวนประจุสุทธิของอิเล็กตรอนที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบต่างๆ พิจารณาที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้ออกมาจากผลึก KCl และ KBr ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ทั้งผลึก KCl และ KBr มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ fcc แต่ KCl มีจำนวนอิเล็กตรอนของไอออนของธาตุ K^+ และไอออนของธาตุ Cl^- เท่ากัน ค่า $f_j(k^+)$ และ $f_j(Cl^-)$ มีค่าเกือบเท่ากันจึงเกิดการหักล้างกันขึ้น ดังนั้นจึงไม่ปรากฏที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากระนาบต่างๆ ของผลึกบางค่าออกมา ในขณะที่ KBr จะมีจำนวนอิเล็กตรอนของไอออนของธาตุ K^+ และไอออนของธาตุ Br^- ไม่เท่ากัน ดังนั้นค่า $f_j(K^+)$ จะมีค่าแตกต่างจาก $f_j(Br^-)$ จึงไม่เกิดการหักล้างกันขึ้น ดังนั้นจึงปรากฏที่ความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทุกพีคทั้งหมดออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึก



รูปที่ 2.18 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึก
 (ก) KCl
 (ข) KBr

ในทางปฏิบัติในปัจจุบันเมื่อได้พีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกเราจะนำมาเปรียบเทียบกับตารางไฟล์มาตรฐานของผลึกของสารชนิดต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ต่อไปว่าสารนั้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้สมการที่ 2.3 นั้น จะใช้ในกรณีที่เป็โครงสร้างผลึกที่ยังไม่เคยมีใครทราบมาก่อน (unknown) ซึ่งมักต้องทำจากผลึกที่เป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) เท่านั้น

2.5.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [4, 12]

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยที่ $a=b=c$ และ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.7)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2.8)$$

โดยที่ a = ค่าคงที่ของโครงผลึก

2.5.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล [4, 9]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่างๆ $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{1}{c^2} \quad (2.9)$$

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope:SEM) [13-14]

การใช้อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะทำให้เห็นภาพขยายของสารตัวอย่างได้ชัดเจน นอกจากนี้เทคนิคในการสร้างเลนส์อิเล็กตรอนเพื่อให้เห็นความสามารถในการแจกแจงและกำลังขยายสูงแล้ว กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การมองเห็นภาพขยายที่เกิดจากคลื่นอิเล็กตรอนด้วยตาเปล่าและการบันทึกภาพ เนื่องจากมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นปริมาณอิเล็กตรอนด้วยตาเปล่าได้เหมือนกับมองเห็นกับการมองเห็นความสว่างของแสง

2.6.1 สัญญาณอิเล็กตรอน [13-14]

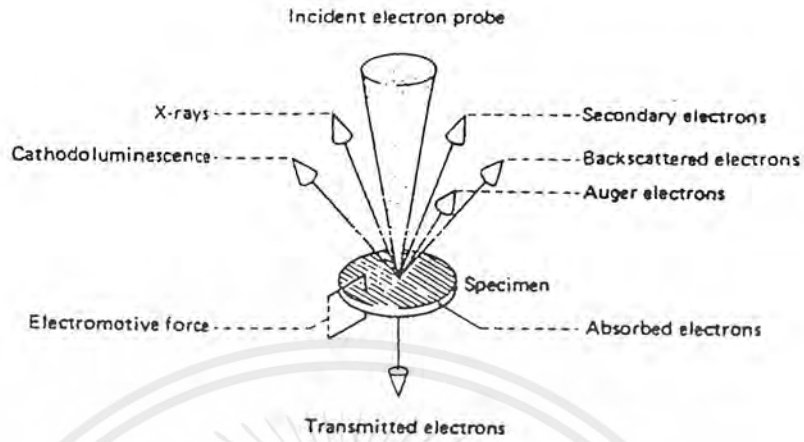
เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวล มีประจุจึงมีความยาวคลื่นมากและมีพลังงานต่ำกว่า รังสีเอ็กซ์ มีการทำอันตรกิริยากับอะตอมที่อยู่ภายในเนื้อสารสามารถเบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กมีอำนาจในการทะลุทะลวงต่ำ จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาควัดความหนาของฟิล์มบาง และศึกษาคุณสมบัติทั้งเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณของอะตอมของธาตุที่อยู่ภายในเนื้อสาร ขนาดความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนมีค่าเป็นตามสมการ

$$\lambda(A^\circ) \cong \frac{12}{[\epsilon(eV)]^{1/2}}$$

เมื่อ $\epsilon = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$ (2.10)

โดยที่ λ = ค่าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wave length)
 m = มวลของอิเล็กตรอน = 0.911×10^{-27} g
 ϵ = พลังงานของอิเล็กตรอน
 h = ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.626×10^{-34} Js = 6.62×10^{-27} erg sec

ถ้าอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกกระทบชิ้นสารตัวอย่าง (อิเล็กตรอนปฐมภูมิ) ทำอันตรกิริยากับอะตอมของโครงสร้างในชิ้นตัวอย่าง และ เหนี่ยวนำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาค และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง อนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอันตรกิริยาเหล่านี้ ในงานจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมักนิยมเรียกว่าสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัญญาณอิเล็กตรอนในลักษณะต่างๆ ของอันตรกิริยา

ชนิดและปริมาณของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับธาตุองค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง ซึ่งอธิบายพอสังเขปดังนี้

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรของอะตอม หลังการดูดกลืนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานต่ำและจะเกิดขึ้นได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างต่ำ

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลือจากการดูดกลืนพลังงานของชิ้นตัวอย่าง ปริมาณของอิเล็กตรอนนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและภาคตัดขวางการดูดกลืนพลังงานของธาตุองค์ประกอบในชิ้นตัวอย่าง

อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชิ้นตัวอย่าง (absorbed electrons)

เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นตัวอย่างหมด และพลังงานที่สูญเสียจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งมีผลให้ตัวอย่างไหม้เกรียมได้

รังสีเอ็กซ์ (x-rays)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาหลังการทำอันตรกิริยาระหว่างอะตอมบนชิ้นสารตัวอย่างกับอิเล็กตรอนพลังงานสูงแบ่งเป็น 2 ชนิด

รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (continuum x-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นกระจายเป็นช่วงกว้าง (broad spectrum) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงระหว่างนิวเคลียสกับวงโคจรชั้นในของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูญเสียพลังงานและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทันที

รังสีเอ็กซ์เรืองเฉพาะธาตุ (characteristic x-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับอิเล็กตรอนในชั้นโคจร K, L, หรือ M แล้วอิเล็กตรอนของชั้นโคจรใดโคจรหนึ่งหลุดออกมาอะตอมนั้นจะรักษาสมดุลของโครงสร้างด้วยการรับอิเล็กตรอนของชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นถัดออกไปมีพลังงานสูงกว่าชั้นโคจรที่ถูกเหวี่ยงมาให้หลุดออกไป ดังนั้นก่อนที่อิเล็กตรอนชั้นถัดไปจะเข้ามาแทนที่ จะต้องลดพลังงานด้วยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้ตัวอิเล็กตรอนนี้มีระดับพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่จะแทนที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจึงมีความยาวคลื่นเฉพาะระดับพลังงานของอะตอมของธาตุนั้นๆ สามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณและคุณภาพได้

ไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electrons)

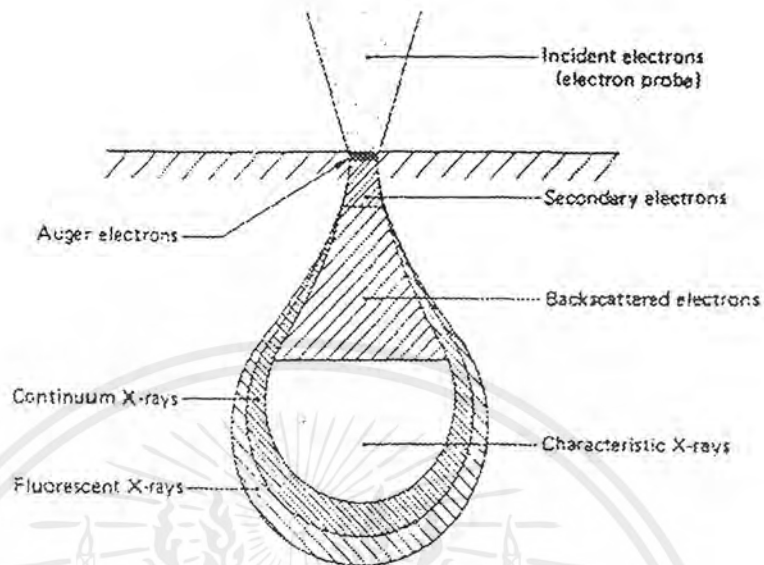
เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรจากการกระตุ้นของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากชั้นตัวอย่างให้ประโยชน์มากในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเบา

แสงเรืองจากชั้นตัวอย่าง (cathodoluminescence)

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น เกิดจากอะตอมของชั้นตัวอย่างได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกเลื่อนเข้าสู่สภาวะที่ถูกกระตุ้นและกลับเข้าสู่สภาวะปกติ (ground) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force)

เป็นปริมาณของไฟฟ้าที่เกิดจากความแตกต่างของประจุระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นสารตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนรอนแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน และเกิดจากชั้นความลึกของชิ้นสารตัวอย่างต่างกัน ขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนซึ่งบังคับได้ด้วยศักดาไฟฟ้าเร่ง ถ้าศักดาไฟฟ้ายิ่งสูงอันตรกิริยาก็จะเกิดในความลึกมากขึ้น และถ้าเลขอะตอมของธาตุนั้น อันตรกิริยาก็จะเกิดกว้างขึ้น ชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.20 แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนในชิ้นสารตัวอย่าง

2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร [13-14]

การวิเคราะห์ด้วยลำอิเล็กตรอนนอกจากจะให้รายละเอียดของผิวและโครงสร้างของชิ้นตัวอย่างที่กำลังขยายสูง (โดยการศึกษาภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน) แล้วยังสามารถวิเคราะห์ธาตุที่จุดต่างๆ บนผิวตัวอย่างได้ดีอีกด้วย การทำงานของระบบต่างๆ รวมทั้งการเกิดภาพในจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีรายละเอียดในบทความเรื่อง "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน" [13] ยกเว้นในการวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ WDS และระบบ EDS ซึ่งจะเป็นหัวข้อสำคัญในบทความเรื่องนี้อย่างไรก็ดี เพื่อความต่อเนื่องและความสมบูรณ์ในการศึกษาการทำงานของระบบวิเคราะห์ธาตุทั้งสอง จึงจำเป็นต้องศึกษาการเกิดรังสีเอกซ์อันเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสารในชิ้นตัวอย่าง

จากรูปที่ 2.19 เมื่อลำอิเล็กตรอนตกลงบนชิ้นตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสารในชิ้นตัวอย่าง ทำให้เกิดรังสีเอกซ์อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmitted electron) อนุภาคต่างๆ เหล่านี้ล้วนแต่เป็นสัญญาณที่สำคัญยิ่งในงานจุลทรรศน์เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ซึ่งมีการเกิดตามลำดับชั้นดังแสดงในรูป 2.21 อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกลงบนชิ้นตัวอย่างจะผ่านลึกเข้าไปใกล้นิวเคลียสของปรมาณูและชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้นิวเคลียส เช่น วงโคจร K และวงโคจร L ให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่ถูกชนหลุดออกไปคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในวงโคจรนั้นช่องว่างดังกล่าวมีอายุสั้นมากเพียงประมาณ 10^{-15} s เพราะจะมีอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่ากระโดดเข้ามาแทนที่พร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของ รังสีเอ็กซ์และเป็นรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของแต่ละธาตุ

จากรูปที่ 2.21 ถ้าอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานเท่ากับ E_i และพลังงานของอิเล็กตรอนในวงจร K เท่ากับ E_K โดยที่ $E_i > E_K$ พลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกนอกวงโคจรจะเท่ากับ E ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$E = E_i - E_K \quad (2.11)$$

ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจร L เท่ากับ E_L พลังงานของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$E_{cx} = E_i - E_K \quad (2.12)$$

รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นมีโอกาสที่จะไปชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรนอก เช่น ในวงโคจร L ทำให้เกิดไอเจอร์อิเล็กตรอน ซึ่งดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวไป การเกิดไอเจอร์อิเล็กตรอนทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวลดลง

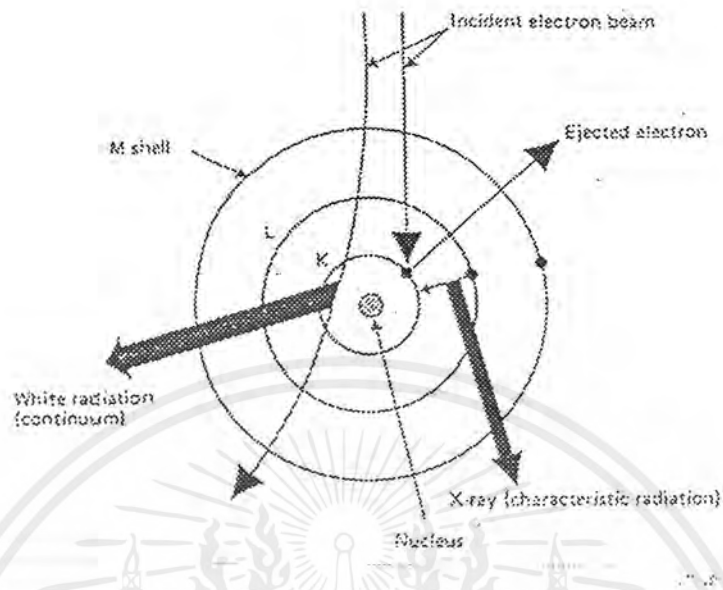
รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนวงนอกไปยังวงโคจรชั้น K L และ M มีชื่อว่า K x-rays L x-rays และ M x-rays ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ธาตุจากการเรืองรังสีเอ็กซ์นั้นจะสนใจเฉพาะ K x-rays และ L x-rays เท่านั้น เพราะรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวอื่นๆ นอกเหนือจาก K x-rays และ L x-rays มีพลังงานต่ำเกินไป

อักษรกรีก α และ β พร้อมทั้งเลขกำกับบ่งบอกรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกิดจากการแทนที่ระหว่างระดับพลังงานหลักและระดับพลังงานย่อย เช่น

L_α เกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น M ไปยังที่ว่างในวงโคจรย่อย ชั้น L เป็นต้น

พฤติกรรมการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในปรมาณูที่ซับซ้อนสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นโดยอาศัยกฎเกณฑ์ในกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

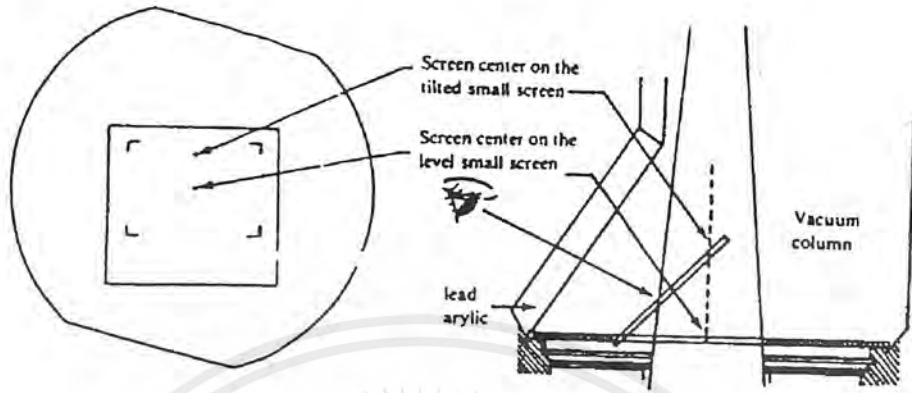


รูปที่ 2.21 รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

2.6.3 เทคนิคการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณภาพ [13-14]

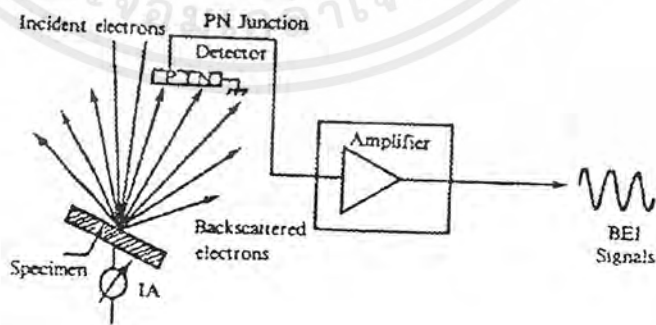
การที่จะเห็นรายละเอียดของภาพโครงสร้างไมโครในแต่ละบริเวณที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบนั้น จะต้องเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นภาพ หรือสัญญาณภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ซึ่งมักจะพบอยู่ 2 วิธี คือ

การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนหรือบางครั้งตัวคลื่นอิเล็กตรอนให้เป็นภาพโดยอาศัยการเรืองแสงของสารเรืองแสงประเภท ZnS เมื่อคลื่นอิเล็กตรอนจากเลนส์อิเล็กตรอนตกกระทบบนฉากเรืองแสง (fluorescent screen) สารเรืองแสงแต่ละบริเวณจะรับโอนถ่ายพลังงานจากอิเล็กตรอน และปลดปล่อยคลื่นแสงซึ่งให้ความสว่างตามปริมาณความเข้มของคลื่นอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของขึ้นตัวอย่าง เกิดภาพขยายโครงสร้างไมโครบนฉากเรืองแสงสามารถมองผ่านช่องดูภาพซึ่งทำด้วยแผ่นพลาสติกใสกันรังสีเอกซ์ (lead acrylic) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการจัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน



รูปที่ 2.22 แสดงระบบการดูภาพขยายขนาดไมโครในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ด้วยฉากเรืองรังสี

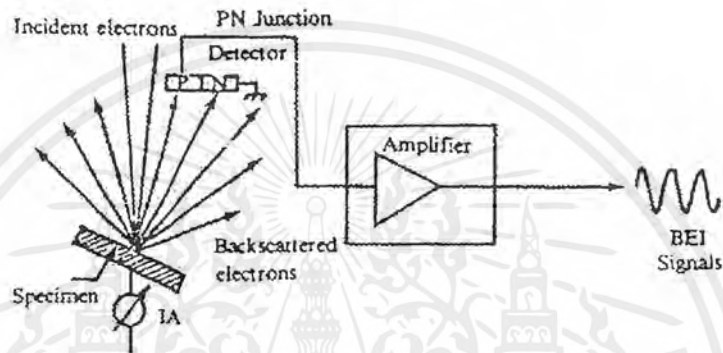
การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยอาศัย อุปกรณ์วัดสัญญาณอิเล็กตรอน (SEI or BEI detector) และหัววัดรังสี (radiation detector) การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณภาพ อาศัยอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยแผ่นเรืองรังสีและหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 อิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะถูกดึงให้เข้าหาอุปกรณ์วัดด้วยสนามไฟฟ้า (+10 kV) และโอนถ่ายพลังงานให้แผ่นพลาสติกเรืองรังสี แสงเรืองที่เกิดขึ้นจะผ่านท่อนำแสงไปยังโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน และขยายสัญญาณให้แรงขึ้นสัญญาณนี้เป็นสัญญาณภาพที่จะส่งให้หลอดภาพต่อไป



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณภาพ

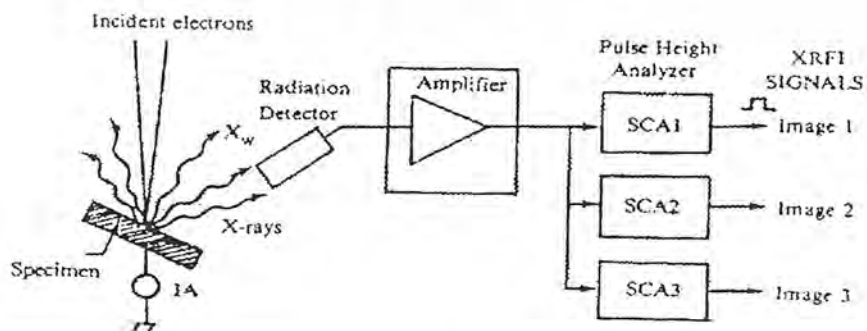
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กลับให้ เป็นสัญญาณภาพต้องอาศัยอุปกรณ์ วัสดุแบบกึ่งตัวนำประเภทหัวต่อ (PN-junction) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ซึ่งมีพลังงานสูงจะโอนถ่ายพลังงานให้กับบริเวณปลอดพาหะของหัววัดกึ่งตัวนำเหนี่ยวนำให้เกิด ปริมาณของคู่อิเล็กตรอนและโฮล หรือสัญญาณไฟฟ้าขึ้นในหัววัด สัญญาณนี้คือสัญญาณภาพซึ่ง ส่งผ่านให้วงจรขยาย ขยายสัญญาณให้แรงขึ้นเพื่อเปลี่ยนเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์กลับเป็นสัญญาณภาพ

ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนรังสีเอกซ์เรืองเฉพาะธาตุเป็นสัญญาณภาพจำเป็นต้องใช้หัววัด รังสีพรอพอร์ชันแนล หรือหัววัดกึ่งตัวนำประเภท Si(Li) และระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ เรืองเฉพาะธาตุเพื่อเลือกรายละเอียดเฉพาะธาตุขององค์ประกอบบนพื้นตัวอย่างมาแสดงเป็นภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 หัววัดรังสีจะทำหน้าเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์เรืองให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และระบบวิเคราะห์พลังงาน SCA (single channel analyzer) จะเลือกสัญญาณเฉพาะธาตุผสม กับสัญญาณในระบบกำเนิดภาพ



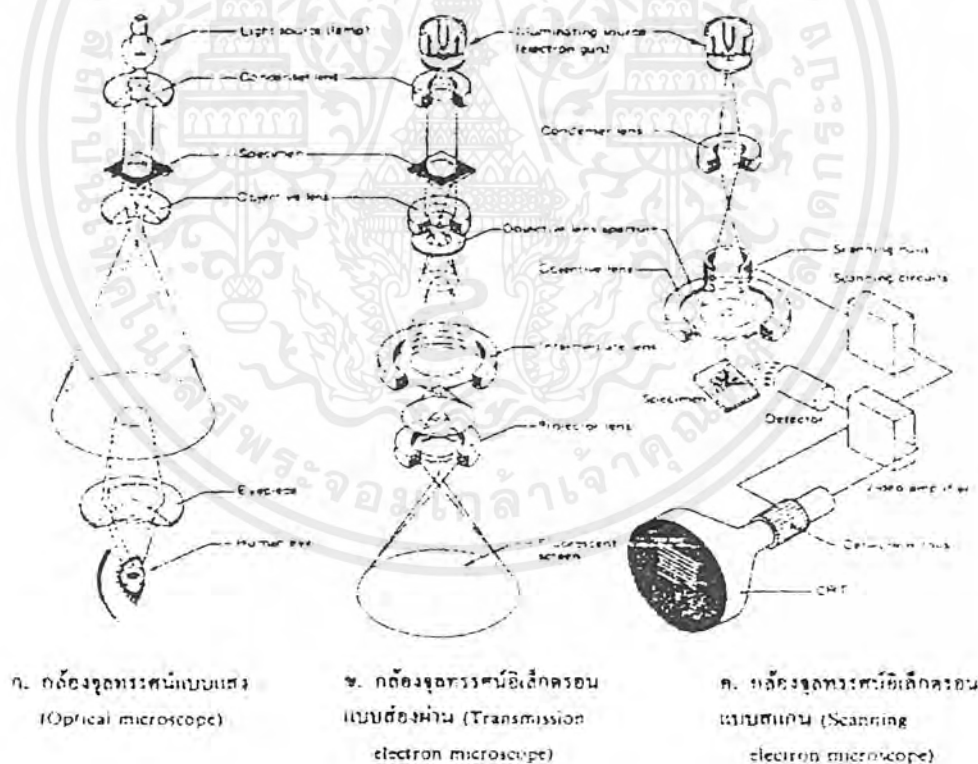
รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนรังสีเอกซ์เป็นสัญญาณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณภาพแบบนี้ เหมาะกับการจัดระบบเลนส์อิเล็กทรอนิกส์แบบสแกน ซึ่งจะเก็บสัญญาณภาพแต่ละจุดจากปลายลำอิเล็กตรอน ไปปรากฏเป็นภาพ (image) บนจอภาพรังสีแคโทด (CRT)

2.6.4 ระบบภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [13-14]

ถ้าพิจารณาจากกลุ่มสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนและชิ้นตัวอย่าง แล้วจะเห็นว่า มีสัญญาณหลักอยู่สองกลุ่มคือ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดบนพื้นผิวตัวอย่างและสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ทะลุผ่านชิ้นตัวอย่าง ซึ่งเอื้ออำนวยต่อการศึกษภาพไมโครกราฟทั้งบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่างและในชิ้นเนื้อเยื่อบาง เช่นเดียวกับกระบวนการของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแต่ต้องมีการจัดระบบเลนส์อิเล็กทรอนิกส์และเทคนิคทางสัญญาณภาพที่เหมาะสม ดังแสดงภาพเปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนในรูปที่ 2.26

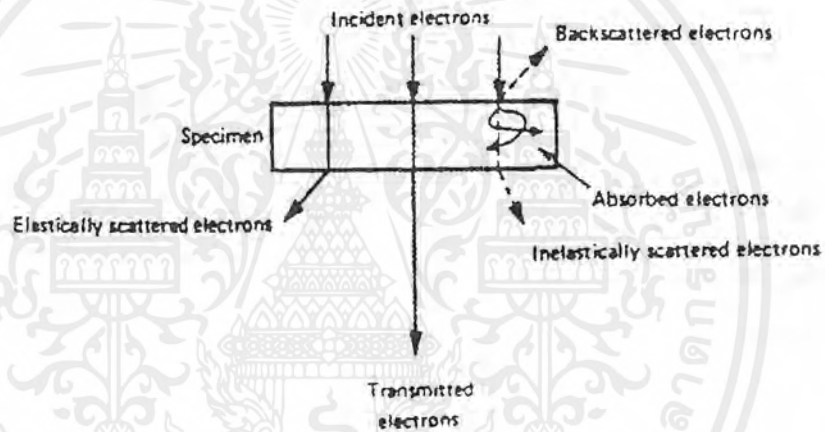


รูปที่ 2.26 เปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านแบบสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

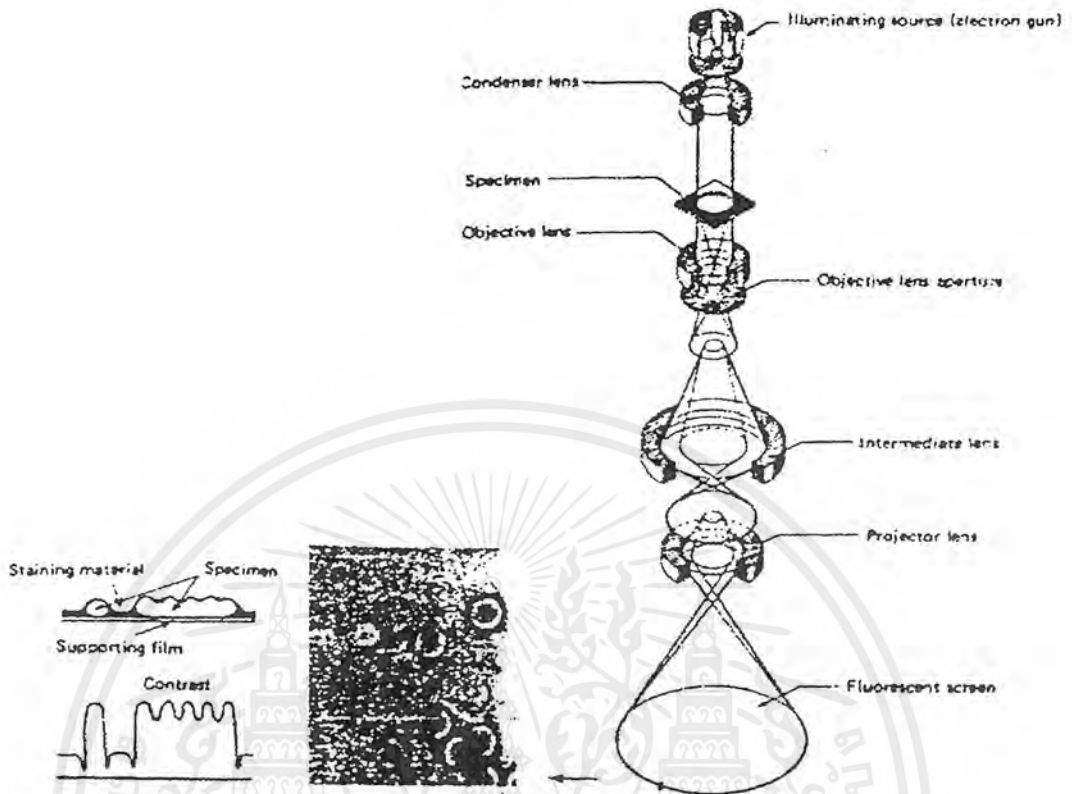
ระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านในรูปที่ 2.21ข. เหมาะกับการสร้างภาพของ สัญญาณทะลุผ่านขึ้นตัวอย่าง เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาโครงสร้างภายในชิ้นเนื้อเยื่อและใน ชิ้นตัวอย่างบางมาก สัญญาณอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านขึ้นตัวอย่างจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านโดยตรง (directly transmitted electron)
2. อิเล็กตรอนที่ชนกับอะตอมแบบยืดหยุ่น อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนทิศทางแต่ไม่ได้สูญเสีย พลังงาน (elastically scattered electron)
3. อิเล็กตรอนที่ชนกับอะตอมแบบไม่ยืดหยุ่นจะเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานไป บางส่วน (inelastically scattered electron) ดังแสดงในรูป 2.22



รูปที่ 2.27 กลุ่มสัญญาณอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



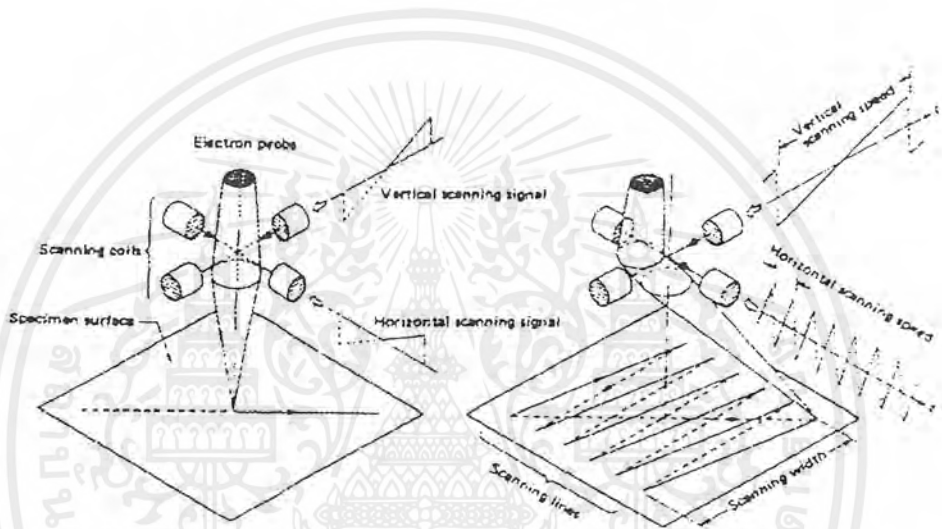
รูปที่ 2.28 การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบอิเล็กตรอนสองผ่าน

การสร้างภาพของระบบนี้ ลำอิเล็กตรอนที่บังคับด้วยคอนเดนเซอร์เลนส์จะส่งผ่านขึ้นตัวอย่างกลุ่มสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาในชั้นตัวอย่างจะถูกบังคับด้วยระบบเลนส์ขยายภาพและฉายภาพขยายของสัญญาณอิเล็กตรอนลงบนฉากเรืองแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นภาพที่ตาเปล่ามองเห็นทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านโดยตรง และสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่ตกกระทบบนระนาบของฉากเรืองแสง จะช่วยให้ภาพเกิด contrast แบบ scattering absorption contrast

ระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกนในรูปที่ 2.26 ค. เหมาะกับการสร้างภาพของกลุ่มสัญญาณในการศึกษาโครงสร้างบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่าง ระบบเลนส์แบบนี้ต่างไปจากแบบแรกคือการสร้างภาพจะต้องบีบลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์ออฟเฟกทีฟจนมีลักษณะเป็นโพรม (electron probe) ภาพไมโครไม่สามารถฉายไปบนฉากเรืองแสงได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยระบบ

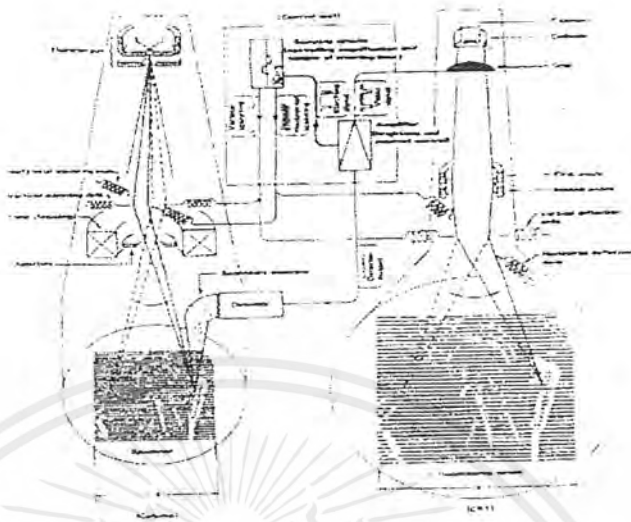
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สแกนลำอิเล็กตรอนบนพื้นที่ไม่ใครที่กำหนดบนชิ้นสารตัวอย่าง และเลือกรับสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดใดๆ จุดต่อจุดที่ปลายโพรมิอิเล็กตรอนเลื่อนไป เพื่อนำไปสร้างภาพขยายที่เข้าจังหวะกัน (synchronize) บนพื้นที่ของจอภาพแคโทดเรย์ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนจึงต้องมีชุดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการสแกน (scanning coil) และชุดกำเนิดภาพเพิ่มขึ้น ชุดควบคุมการสแกนจะทำหน้าที่บังคับให้โพรมิอิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวแกนนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การสแกนโพรมิอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นสารตัวอย่าง

สัญญาณควบคุมการสแกนของโพรมิอิเล็กตรอนในคอลัมน์สัญญาณภาพ และชุดกำเนิดภาพจะกำเนิดพร้อมกัน ดังนั้นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นขณะที่อิเล็กตรอนโพรมิเคลื่อนไปบนผิวชิ้นสารตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์วัด ปรากฏเป็นสัญญาณภาพบนจอภาพจุดต่อจุดตามแนวสแกน ทั้งแนวนอนและแนวตั้งบนระนาบ ประกอบกันเป็นภาพขยาย ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การสร้างภาพในระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน

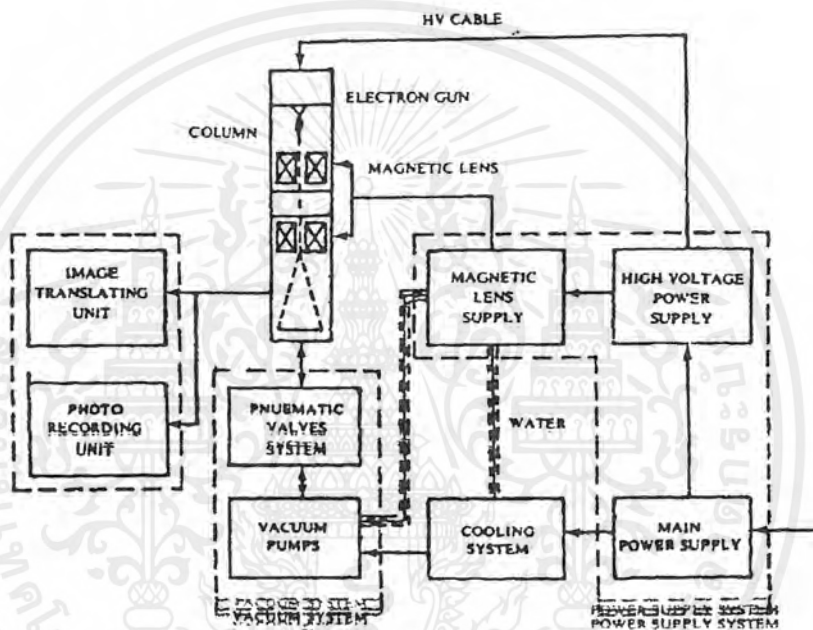
จะเห็นว่าการพิจารณากำลังขยายของภาพที่เกิดในกล้องจุลทรรศน์แบบสแกนนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนพื้นที่ขึ้นสารตัวอย่าง (a) กับขนาดความกว้างของเส้นสแกนบนจอภาพแคโทดเรย์ (b) ดังนั้นกำลังขยายจึงมีค่า $M=b/a$ ระบบการสร้างภาพแบบลำอิเล็กตรอนสแกนนอกจากจะสร้างภาพขยายของโครงสร้างไมโครที่เกิดจากสัญญาณอิเล็กตรอนบนพื้นผิวขึ้นสารตัวอย่างแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพของโครงสร้างไมโครที่เกิดจากสัญญาณอิเล็กตรอนทะลุผ่านขึ้นสารตัวอย่างบางของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านได้อีกด้วย โดยการนำอุปกรณ์วัดสัญญาณอิเล็กตรอนไปติดตั้งด้านใต้แผ่นฉากเรืองแสง และเปิดช่องทางให้สัญญาณอิเล็กตรอนผ่านลงไปยังอุปกรณ์วัดได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนระบบนี้เรียกว่า STEM (Scanning Transmission Electron Microscope) ซึ่งจะให้ภาพของ scanning transmission electron images.

2.7 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [13-14]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน (TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะโครงสร้างภายนอกคล้ายกัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. ระบบออปติคัลอิเล็กตรอน (electron optics system)
- ข. ระบบสุญญากาศ (vacuum system)
- ค. ระบบระบายความร้อน (cooling system)
- ง. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply system)
- จ. ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ (image translating and photo recording)

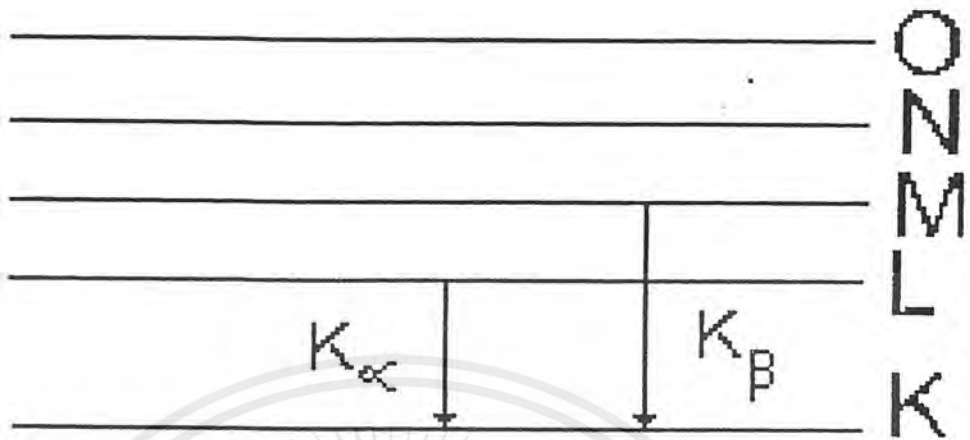


รูปที่ 2.31 แสดงแผนภาพเบื้องต้นของระบบต่างๆ ภายนอกกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.8 การศึกษาสเปกโตรสโคปีของการแจกแจงพลังงานรังสีเอกซ์ที่ได้จากอะตอมของธาตุต่างๆ (Energy Dispersive Spectroscopy:EDS) [13-14]

หลักการของวิธีนี้คือ ยิงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเข้ามายังผิวหน้าของโครงผลึกซึ่งจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบ เช่นอยู่ในวงโคจรชั้น K ในอะตอมของผลึกให้หลุดออกไปเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพลังงานถัดไป เช่นในวงโคจรชั้น L หรือ M ย้ายสถานะพลังงานลงมาแทนที่ จะปล่อยรังสีเอกซ์ในช่วงความยาวคลื่น K_{α} หรือ K_{β} ออกมา ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.32 อะตอมของแต่ละธาตุจะให้พลังงานค่าแตกต่างกัน รังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจึงเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนที่ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ K_{α} และ K_{β}

ระบบ EDS วัดพลังงานของรังสีเอ็กซ์เฉพาะธาตุโดยตรง และสามารถกำหนดความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่กำลังวัดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพลังงานดังต่อไปนี้ [14]

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.13)$$

โดย E = พลังงานของรังสีเอ็กซ์
 h = ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.626×10^{-34} Js
 v = ความถี่ของรังสีเอ็กซ์
 c = ความเร็วของแสงในสุญญากาศ
 λ = ความยาวคลื่น

เมื่อแทนค่าคงที่ h และ c ลงในสมการ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์

$$E(\text{keV}) = \frac{1.2396}{\lambda(\text{nm})} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าของรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวจากพลังงาน E ที่วัดได้

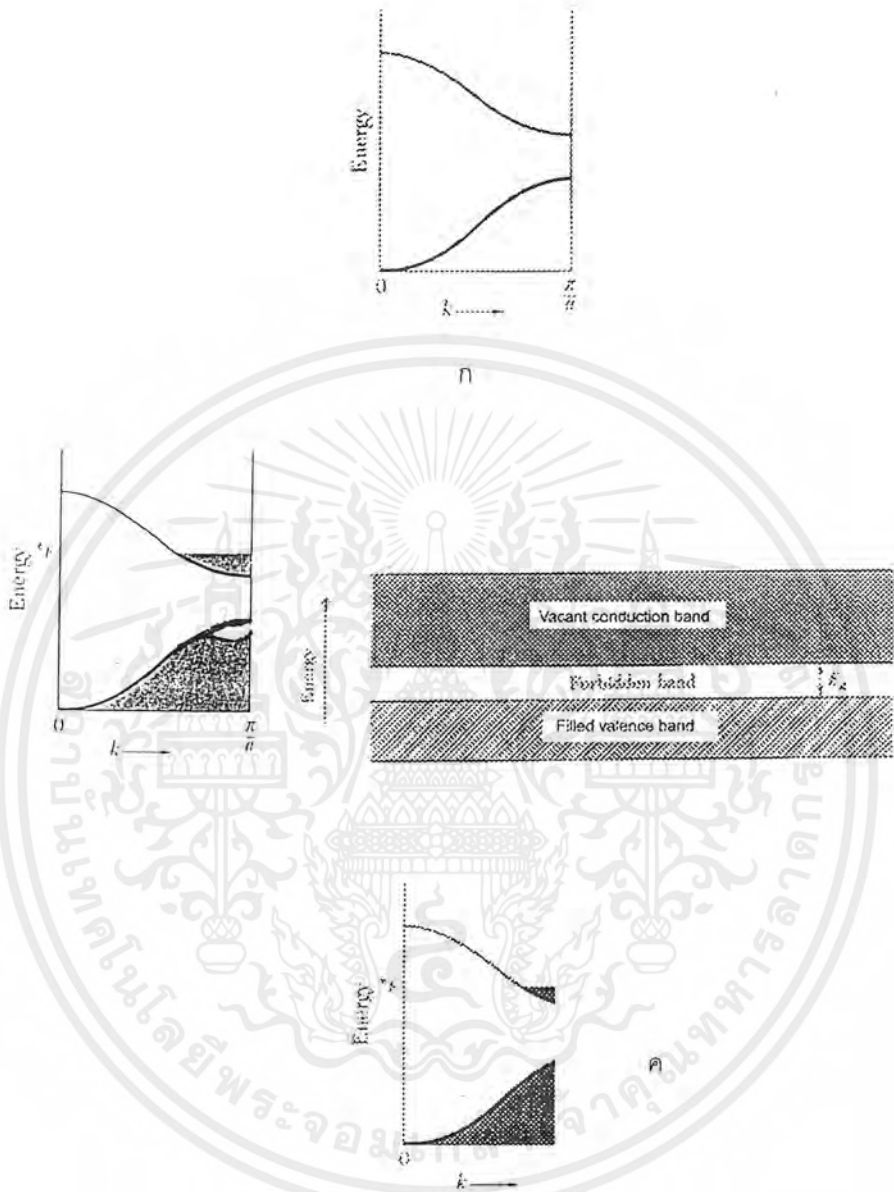
บทที่ 3

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์, ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS, ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง, การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำและการคำนวณขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

3.1 การเกิดสีของผลึก [9]

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน ในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ ที่เป็นอินทรินสิก (intrinsic) ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์คูลอมบ์ยึดเหนี่ยวเอาไว้จะตอม ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย และแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยเรียกว่าบริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap หรือ forbidden band) ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องว่างนั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap: E_g) ขนาดของ E_g จะถูกนำมาใช้แบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3$ eV, สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3$ eV และตัวนำไม่มีค่า E_g เพราะมีแถบวาเลนซ์ และแถบนำ ซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ ที่เป็น

อินทรีนสิก

ก. ฉนวน

ข. สารกึ่งตัวนำ

ค. ตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ของสารตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อฉายพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ($h\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึกอิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืน (absorb) พลังงานโฟตอน เพื่อย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง พลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกมาจากผลึกจึงทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนที่ถูกส่งผ่านออกมา เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลือง-ส้ม เนื่องจากมีค่า $E_g = 2.42$ eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในย่านอุลตราไวโอเล็ตจนถึงสีน้ำเงิน หรือสีเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในย่านที่มีค่ามากกว่า หรือเท่ากับสีเหลืองออกมาทั้งหมด และเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐาน หรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับย่านแสงสีเหลือง-ส้ม เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลือง-ส้ม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ถ้าพิจารณาให้ฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_0 แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_t ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ต่อจากนั้นเราจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient : α) ได้จากสมการ 3.1 และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอนได้ และนอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วย ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในทางปฏิบัติกันมาก ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

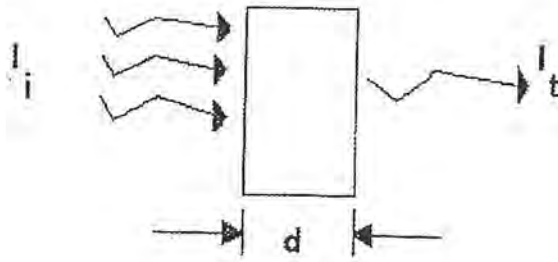
$$I_t = I_0 e^{-\alpha d} \quad (3.1)$$

เมื่อ I_0 = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

I_t = ปริมาณของความเข้มแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการส่งผ่านของแสงในฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

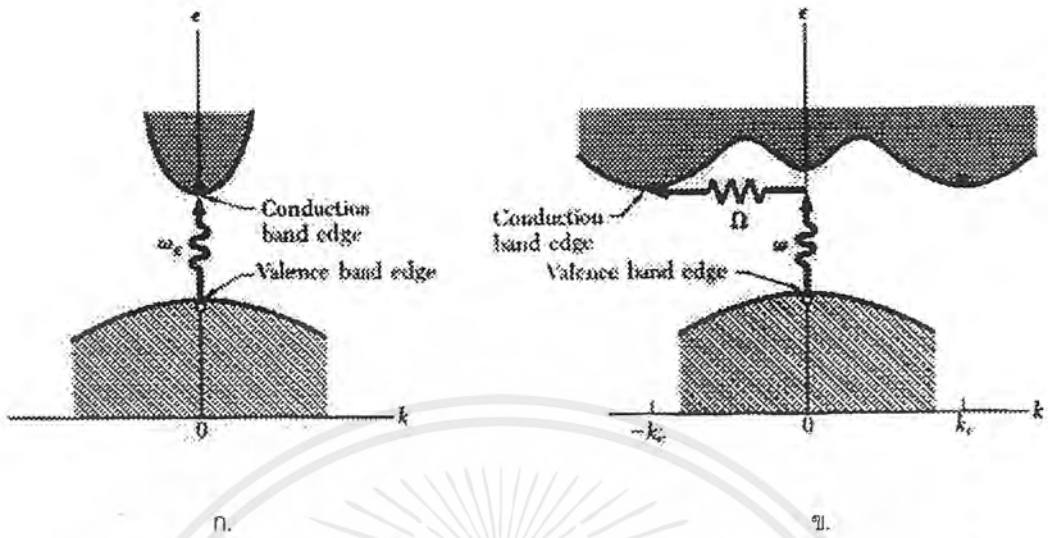
นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธีทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังที่กล่าวมาข้างต้นคือ การสร้างสถานะพลังงานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง ได้แก่

1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก Al_2O_3 เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้ม หรือที่เราเรียกว่าทับทิม (Ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียง 0.5% ไอออน Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงิน หรือที่เราเรียกว่าแซฟไฟร์ ได้แก่ นิล, มรกต และบุษราคัม เป็นต้น
2. การบอมบาร์ดด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง, รังสีแกมมา, รังสีอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมากขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้น กล่าวคือ เมื่อมีแสงตกกระทบผลึกจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน [9]

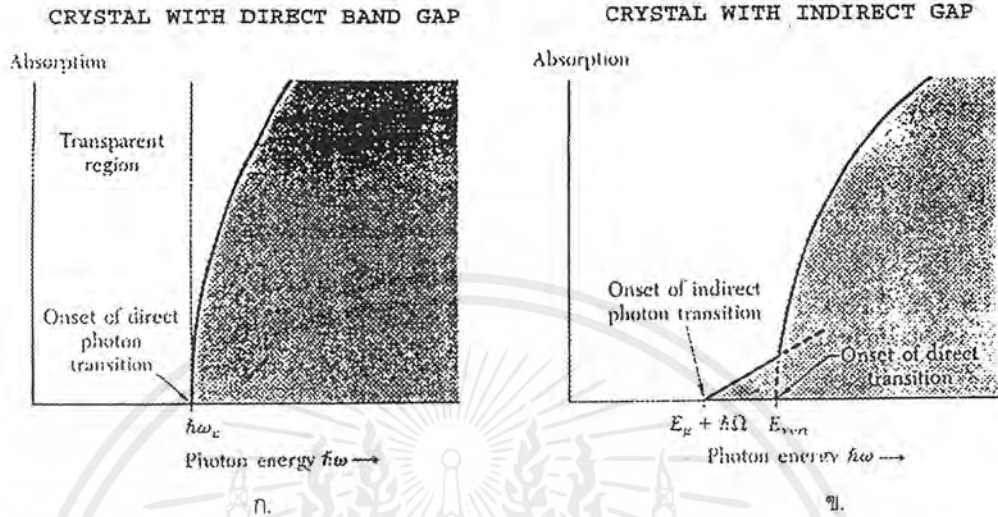
โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบคือ แบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น (wave vector: k) ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega_g = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีที่มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน หรือมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{ver}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจนได้ กราฟแสดงดังรูปที่ 3.4 (ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนนั้นมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งโครงผลึกจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิดการสั่นและสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืนโฟนอน (phonon absorption) แล้วตามด้วยการดูดกลืนพลังงานโฟตอนมีค่าเท่ากับ ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลต่อไป



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของ อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0\text{ K}$)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



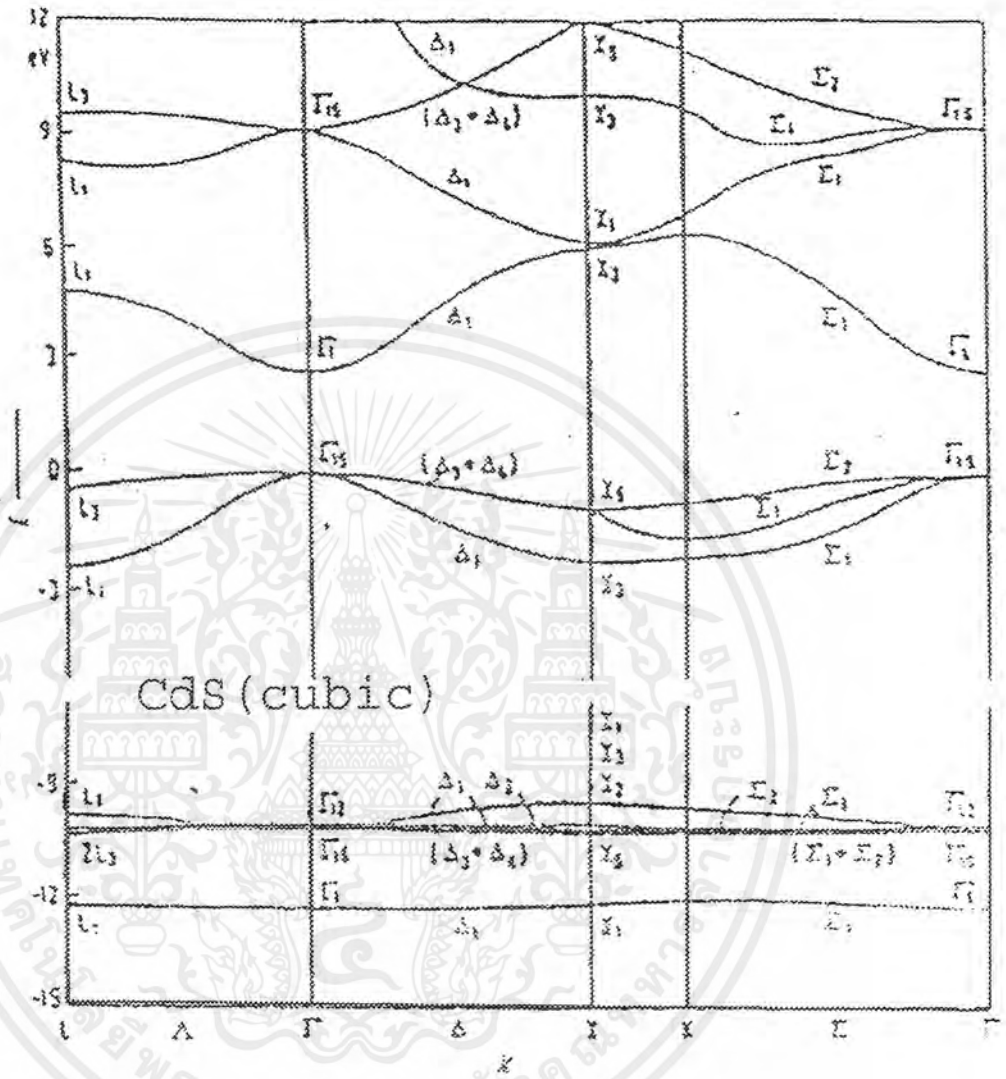
รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0K$)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [15-16]

CdS มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือมีการย้าย (transition) สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์คลื่น (wavevector: k) ค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และเวิร์ทไซท์ ดังแสดงในรูป 3.5 และ 3.6 โดยที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 และ 2.501 eV ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง [16]



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ โดยไม่คิดการคัปปลิง ระหว่างสปิน-ออร์บิท (spin - orbit coupling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [10]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปตัวกลางที่มีค่าสภาพซึมซาบของแม่เหล็ก ($\mu=1$) จะได้สมการคลื่นแสงเป็น

$$E = E_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \quad (3.2)$$

$$H = H_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \quad (3.3)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้าที่มีอัมพลิจูด E_0

H คือ สนามไฟฟ้าที่มีอัมพลิจูด H_0

$k=k_1+ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดย k_1 คือเวกเตอร์จริงและ k_2 คือเวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k \cdot k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

c คือ ค่าความเร็วแสง

ω คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากอากาศ กล่าวคือในตัวกลางจะประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมีแรงทางไฟฟ้าคูลอมบ์ซึ่งมีทั้งแรงดูดและแรงผลักกระทำอันเป็นผลมาจากการกระจายความหนาแน่นของประจุในอะตอมที่สร้างพันธะยึดเหนี่ยวกันไว้อยู่ภายในสารที่ทำให้ตัวกลางทั่วไปมีค่าดัชนีหักเหต่างๆ กัน ดังนั้นเมื่อแสงเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว และความยาวคลื่นขึ้น นอกจากนี้ความหนาแน่นของตัวกลางยังมีผลทำให้ความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน (transmission) ออกมาจากตัวกลางลดน้อยลงไปด้วย พิจารณาให้ดัชนีหักเหจริงในตัวกลาง (n) มีค่าตามสมการ

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.4)$$

เมื่อ c = ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 3×10^8 m/s

v = ความเร็วแสงในตัวกลาง

ดัชนีหักเหเชิงซ้อนมีค่าตามสมการ

$$N = n - ik \quad (3.5)$$

n = ดัชนีหักเหจริง

k = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

สำหรับคลื่นเอกพันธ์ จะได้

$$\begin{aligned} |k_1| &= n\omega / c \\ |k_2| &= k\omega / c \end{aligned} \quad (3.6)$$

แทนสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.1) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง x เป็น

$$x = E_0 \exp[i\omega(n\pi/c - t)] \exp(\omega kx/c) \quad (3.7)$$

E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าค่าสูงสุด

จากสมการที่ (3.7) แสดงถึงคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว $v = c/n$ ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$I \propto EE^* \quad (3.8)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \propto E_0^2 \exp(-2\pi kx/c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$I = I_0 \exp(-4\pi kx/\lambda)$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3.9)$$

$\alpha = 4\pi k/\lambda$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (cm^{-1})

I คือ ความเข้มของแสงที่ตำแหน่ง x

I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบ (W/cm^2)

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

จากสมการที่ (3.9) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dx} \right) \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.10) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

3.5 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ CdS [10]

สารกึ่งตัวนำ CdS มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นแล้วย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งยังสามารถแบ่งได้อีกเป็นสองประเภทคือ การย้ายสถานะพลังงานแบบยินยอม (allowed transition) และแบบต้องห้าม (forbidden transition) โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออฟไดคอลเมตริกอิสิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ กล่าวคือถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานแบบยินยอม เนื่องจากลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลาจึงสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งแบบยินยอมและแบบต้องห้ามได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย้ายสถานะแบบยินยอม

$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\bar{h}}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (hv - E_g)^{\frac{1}{2}} = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

การย้ายสถานะแบบต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = \frac{2c\bar{h}}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \equiv A'(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (3.12)$$

โดยที่ μ	คือ มวลลดทอน (reduced electron-hole mass)
H_{cv}	คือ ออฟดีคอลลเมตริกอิติเมนต์ ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบการนำ
E_g	คือ ช่องว่างแถบพลังงาน
$h\nu$	คือ พลังงานโฟตอน

3.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [9,10]

สำหรับการทดลองของเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ ได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission: %T) ผ่านสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ ตกกระทบ (I_0) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (I_1) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น (λ) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค่าการสะท้อน และการส่งผ่านของ แสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = I_1/I_0 = (1-R)^2 e^{-\alpha d} / (1+R)^2 e^{-2\alpha d} \quad (3.13)$$

$$R = I_r/I_0 = (n-1)^2 + k^2 / (n+1)^2 + k^2 \quad (3.14)$$

T	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
R	คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน
α	คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_t	คือ ความเข้มแสงส่งผ่าน
I_0	คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ
D	คือ ความหนาของสารตัวอย่าง
I_r	คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน
N	คือ ดัชนีหักเห
k	คือ สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทริงชัน (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (3.13) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.15)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการที่ (3.15) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln(I_0/I_t) \quad (3.16)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (3.16) ยังมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นแสง (α_0) ที่เกิดจากการบัพพร้อมมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากย้ายสถานะพลังของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้น เพื่อให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (3.1) และเราสามารถหาค่า E_g ได้จากสมการที่ 3.11 หรือ 3.12 หรือทำได้โดยการลากเส้นโดยประมาณจากกราฟสัมพันธระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั้นเอง และลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเอียง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ก, ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานที่มีขนาดใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงมีน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้ ระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination centers) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

4.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [9]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density: J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field: E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$\sigma = J/E \quad (4.1)$$

โดยที่

$$J = nqv_d \quad (4.2)$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

q คือประจุของอิเล็กตรอน

v_d คือความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ของอิเล็กตรอน

จาก $\mu = v_d/E$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์ คือ

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (4.3)$$

เมื่อ μ_n และ μ_p คือสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของอิเล็กตรอน และ โฮลตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity: ρ) มีค่าเป็น $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นไปตามสมการ

$$\rho = 1/q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4.4)$$

4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [10,11]

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

4.2.1 วิธีวัดโดยตรง (Direct Method)

ใช้กับการวัดสารตัวอย่างรูปทรงระบอบกึ่งทรงกลมที่ทราบขนาดแน่นอน โดยวัดค่าความต้านทาน (R) แล้วจึงคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จาก

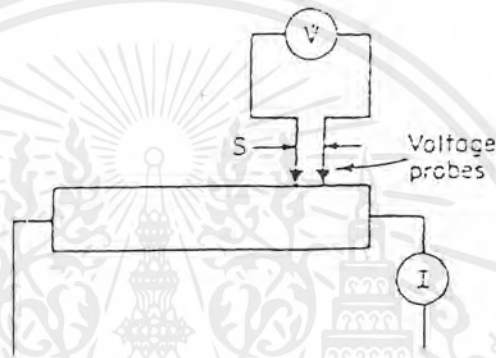
$$\rho = RA/I \quad (4.5)$$

โดยที่ I คือความยาวของสารตัวอย่าง
A คือพื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาความต้านทานของรอยต่อ (contact resistance) ระหว่างสารตัวนำกับขั้วที่สัมผัสด้วย ซึ่งเราสามารถลดผลของความต้านทานที่รอยต่อได้โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า จะพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อย ๆ ลดลงในขณะที่ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะคงที่ นี่คือนิยามของสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แท้จริง

4.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two Point Probe Method)

วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งของสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อโลหะ (ที่ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อได้ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง และโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว

4.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (Linear Four-Point Probe Method)

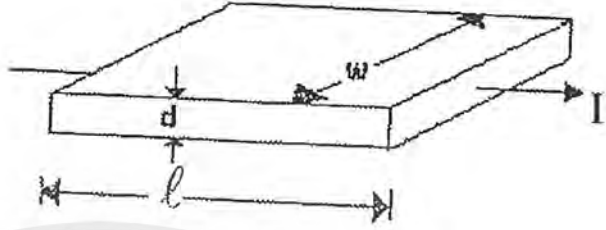
การวัดจะใช้ขั้วสัมผัสสี่ขั้วเรียงกันอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วสัมผัสคู่นอก ส่วนคู่สัมผัสคู่ในวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นแบบสี่ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูป จากกฎของโอห์มและใช้สมการ (4.4) จะคำนวณหาความต้านทานฟิล์มได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{wd} \quad (4.6)$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ($l=w$) ดังนั้นสมการ (4.6) เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \quad \text{ohm}/\square$$

R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

แต่ถ้า $l \neq w$ จะได้ว่า $R_s = R(w/l) \quad (4.7)$

เมื่อพิจารณาการวัดตามรูปที่ 4.1 เราจะหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการ

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left[\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{(s_1 + s_3)} - \frac{1}{(s_2 + s_3)} \right] \quad (4.8)$$

โดยที่ s คือช่องว่างระหว่างขั้ว ในขณะที่ $s_1 = s_2 = s_3$ สมการ (4.8) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = 2\pi sV/I \quad (4.9)$$

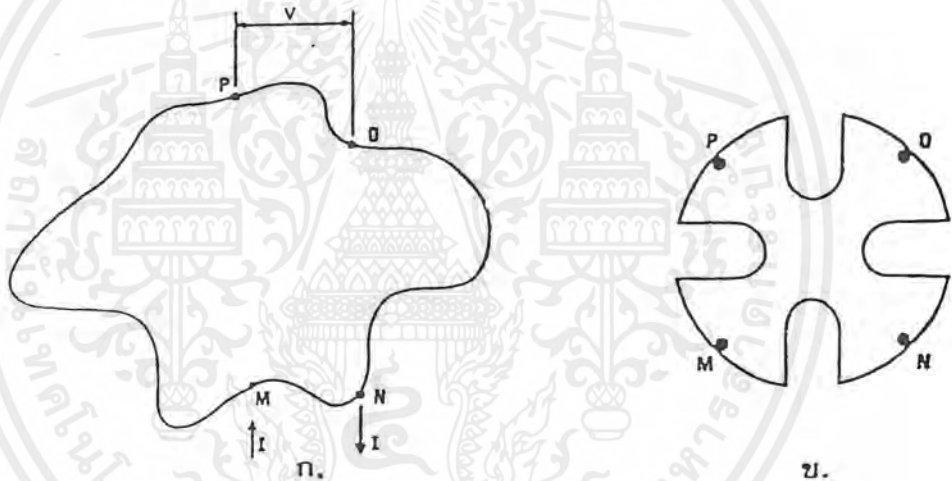
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพอร์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพอร์นั้นจะให้ค่าที่ถูกต้องโดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. จุดสัมผัสจะต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ
3. สารตัวอย่างจะต้องหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อของสารจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแยก

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพอร์

- ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง
- ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

จากรูปที่ 4.4 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M และออกทางจุด N เราสามารถที่จะวัดความต่างศักย์ $V_{\infty} = V_P - V_Q$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_P - V_Q}{I_{MN}} \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกจากจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการ (4.10) คือ

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \quad (4.11)$$

ทั้งสมการที่ (4.10) และ (4.11) จะปรากฏในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้คือ

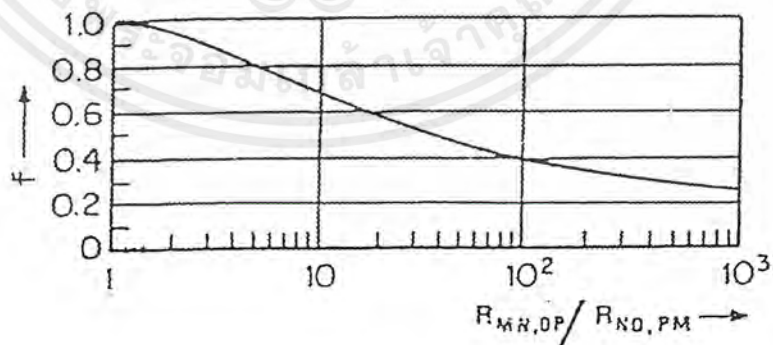
$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{NO,PM}\right) = 1 \quad (4.12)$$

เมื่อ d คือความหนาของขั้วสาร

สมการ (4.12) สามารถเปลี่ยนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}}{2} \right) f \left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}} \right) \quad (4.13)$$

โดยที่ f เป็นฟังก์ชันของ $(R_{MN,OP}/R_{NO,PM})$ เรียกว่าแฟกเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ดังปรากฏอยู่ในรูปที่ 4.4 ดังนั้นสภาพค่าต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำหาได้ง่ายจากสมการ (4.13)



รูปที่ 4.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีวัดทั้งหมดนี้แฟกเตอร์ค่าแก๊สที่สำคัญที่สุดที่จะเป็นเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง คือรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกจากสารกึ่งตัวนำซึ่งจะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (non-blocking contact) เพื่อให้ได้รอยตอดังกล่าวนี้จะต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมรวมทั้งชนิดและรูปร่างของขั้วสัมผัสที่จะต้องทำขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรงปลายแหลมสามารถวัดโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำนั้น ในโครงการพิเศษนี้จะเลือกการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยการวัดด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 6



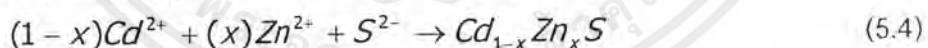
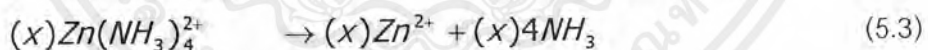
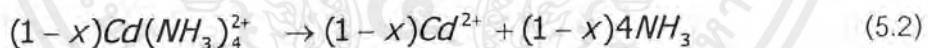
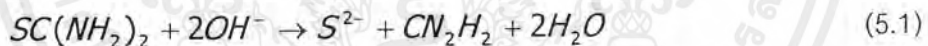
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

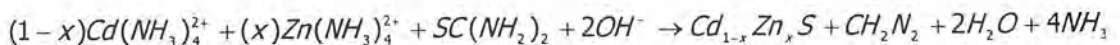
การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ โดยวิธีการเคลือบด้วยการ อาบสารละลายเคมี

5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา

ฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ สามารถเตรียมได้จากวิธีการอาบสารละลายเคมีโดยการจุ่มแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ ในอ่างที่มีสารละลายของเกลือแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$), ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) และสารประกอบไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) ซึ่งจะแตกตัวให้อิออนของซัลเฟอรัที่อุณหภูมิต่ำไม่สูงมากนักโดยสารละลายในอ่างจะมีความเป็นเบส มีค่า pH ประมาณ 10.6-11.8 กระบวนการในการเคลือบฟิล์มนี้เกิดจากการปลดปล่อย Cd^{2+} , Zn^{2+} และ S^{2-} ในสารละลายอย่างช้าๆ ซึ่ง Zn^{2+} จะเข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd^{2+} ในบางส่วนจึงเกิดเป็นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ มาเคลือบติดบนแผ่นรองรับนั่นเอง ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณ Zn ที่มีอัตราส่วนผสมทางเคมีดังต่อไปนี้ $x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ตามลำดับ ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นดังนี้ [2,4]



จาก (5.1), (5.2), (5.3) และ (5.4) สรุปได้ว่า



5.2 การเกิดฟิล์มบางของ $Cd_{1-x}Zn_xS$ บนกระจกสไลด์ [8]

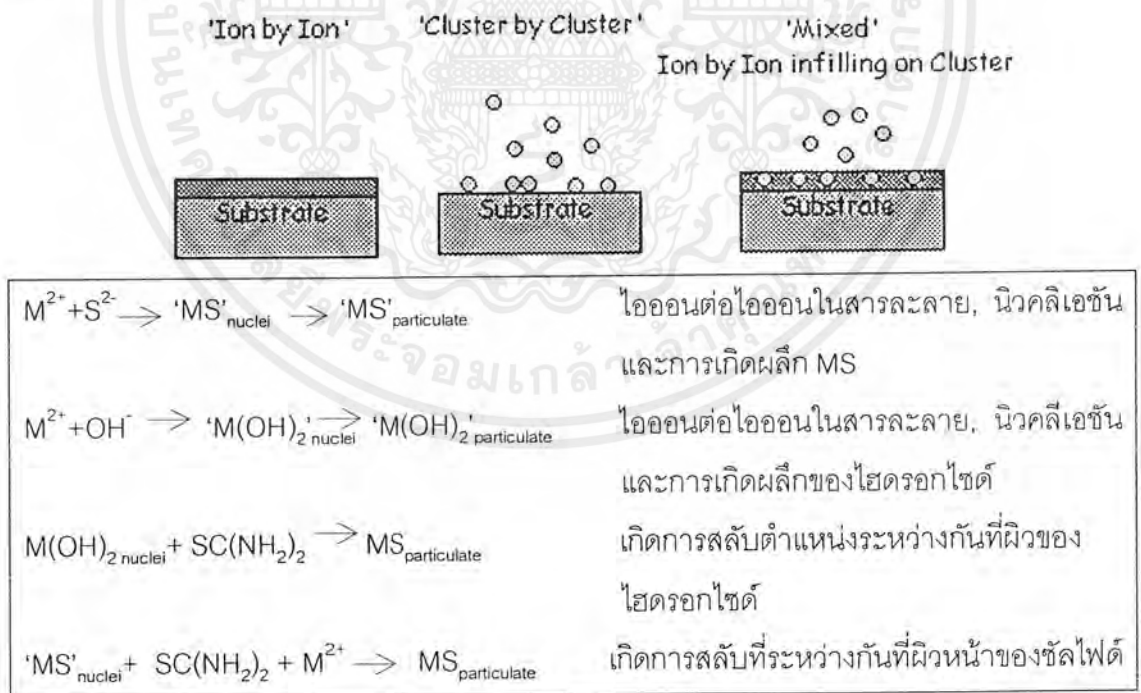
การตกผลึกของ CdS และ ZnS โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับนั้นเป็นวิธีที่สะดวกและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก อีกทั้งยังสามารถเคลือบฟิล์มบางได้พื้นที่ใหญ่ที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากค่าผลผลิตการละลาย (Solubility product ; K_{sp}) และค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant; K_e) ทั้งของ CdS และ ZnS มีค่าที่แตกต่างกัน [2,17] ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็วในการตกผลึกของ ZnS จึงช้ากว่าของ CdS โดยในการตกผลึกของ CdS และ ZnS นี้เกิดขึ้นโดยกลไกหลัก ๆ 2 แบบด้วยกันคือ

1. กลไกในการตกผลึกเกิดขึ้นภายในเนื้อสารละลายโดยจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนก่อนที่จะมาเคลือบติดอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ โดยเรียกกลไกแบบนี้ว่ากลุ่มก้อนต่อกลุ่มก้อน (cluster by cluster) หรือ การตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) แสดงดังรูปที่ 5.1
2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ กล่าวคือ M^{2+} (เมื่อ M^{2+} คือ Zn^{2+} หรือ Cd^{2+}) จะถูกดูดซับไว้บนผิวหน้าของแผ่นรองรับ จากนั้น M^{2+} จะรวมตัวกับ OH^- กลายเป็น $M(OH)_2$ ต่อมาเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง $M(OH)_2$ กับ $SC(NH_2)_2$ ที่ละไอออนจนกระทั่งกลายเป็นกลุ่มก้อน MS เรียกกลไกการเกิดนี้ว่า ไอออนต่อไอออน (ion by ion) หรือ การตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous precipitation) แสดงดังรูปที่ 5.1

แต่โดยทั่วไปแล้ว ไปแล้ว ในการเกิดฟิล์มบางเคลือบที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับนั้นจะเกิดขึ้นจากทั้ง 2 กลไกที่กล่าวมาข้างต้นได้เกิดขึ้นผสมกันและกลไกต่าง ๆ นั้นเกิดขึ้นได้อย่างอิสระ โดยเรียกว่าเป็นกลไกแบบผสม โดยแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางของ MS (เมื่อ M=Cd และ/หรือ Zn บนแผ่นรองรับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

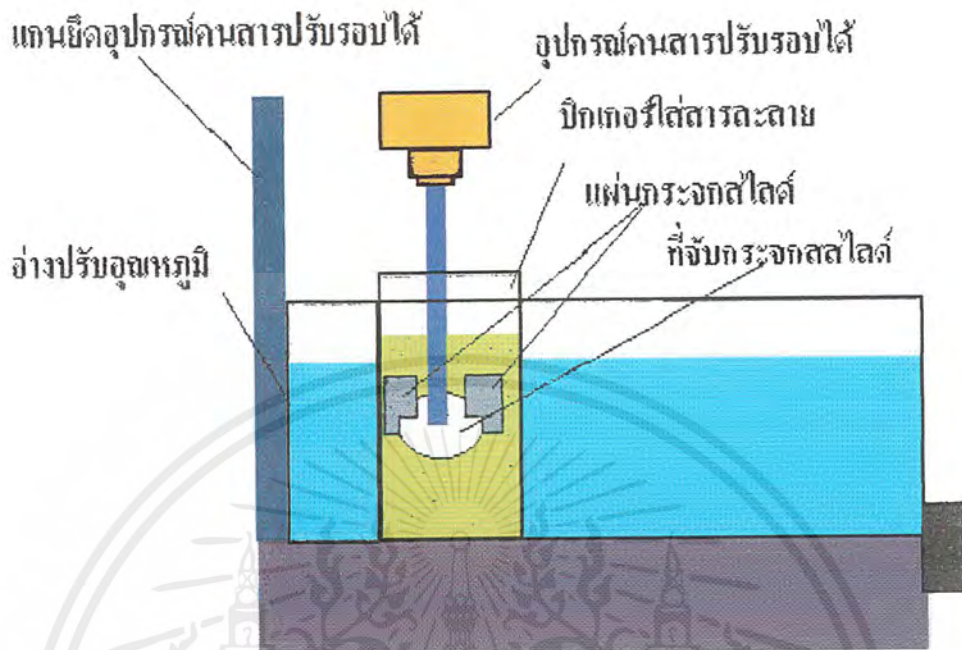
บทที่ 6

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ($Cd_{1-x}Zn_x$)S โดยวิธีการอบสารละลายเคมี และศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนیلและเมื่อมีการแอนนीलที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ซึ่งได้แก่ ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและวัดความหนาของฟิล์มบางโดยการถ่ายภาพ SEM ศึกษาคุณสมบัติทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อหาองค์ประกอบอะตอมของธาตุต่างๆที่อยู่ภายในฟิล์มบางโดยเทคนิค EDS และศึกษาการส่งผ่านแสง (transmittance) เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางและคำนวณหาค่าช่องแถบพลังงาน (E_g) นอกจากนี้ยังวัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe)

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์[4]

อุปกรณ์หลัก คือแท่นยึดแผ่นรองรับทำด้วยเทฟลอน (taflon) ซึ่งเขาจะร่องไว้ 8 ร่อง สำหรับแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้ง แท่งเทฟลอนจะถูกยึดด้วยแท่งแก้วตัน ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับมอเตอร์ แล้วทำให้แท่นยึดแผ่นรองรับหมุนไปด้วยในขณะที่เคลือบฟิล์มบางในอัตราเร็วที่คงที่ประมาณ 60 รอบ/นาที อ่างน้ำ (bath) ที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 100°C ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ปรับให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 80°C นอกจากนี้ยังใช้เครื่องอัลตราโซนิก มาช่วยในการกำจัดตะกอนที่ไม่ต้องการที่ติดอยู่บนฟิล์มที่เตรียมได้บนแผ่นรองรับ ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_x$ S ถูกเทลงบีกเกอร์ที่เติมน้ำปอดประจุนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมด 150 ml มีค่าตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ $[CdSO_4 \cdot \frac{8}{3} H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$ เท่ากับ 0.01 M ส่วน $SC(NH_2)_2$ และ NH_3 (25%) เท่ากับ 0.05 และ 1.5 M ตามลำดับ [1]



รูปที่ 6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์

ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม Cd_xZn_xS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี ในปีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 ml

อัตราส่วนผสม (mixture ratio, x)	ปริมาณสารตั้งต้น			
	$CdSO_4 \cdot \frac{8}{3} H_2O$ (กรัม)	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (กรัม)	$SC(NH_2)_2$ (กรัม)	NH_3 (ml)
X=0.0	0.3848	0.0000	0.5709	16.8
X=0.2	0.3078	0.0862	0.5709	16.8
X=0.4	0.2308	0.1725	0.5709	16.8
X=0.6	0.1539	0.2587	0.5709	16.8
X=0.8	0.0769	0.3450	0.5709	16.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การเตรียมแผ่นรองรับ[4]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จะใช้กระจกสไลด์ขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 12 และ 25 mm ที่ทำความสะอาดอย่างดี ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างด้วยน้ำปอลดประจุ
2. แช่กระจกสไลด์ในสารละลาย HF ปริมาณ 10 ml กับน้ำปอลดประจุ 100 ml เป็นเวลาประมาณ 10-15 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำปอลดประจ่อีกครั้ง
3. ล้างกระจกในน้ำปอลดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 20 นาที
4. เป่ากระจกสไลด์ให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ แล้วนำไปอบในเตาที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ เป็นเวลาประมาณ 20 นาที จะได้กระจกที่สะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

6.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์[4,18]

สารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยเทคนิคการอบสารละลายเคมีประกอบด้วย $[CdSO_4]+[ZnSO_4]$, $SC(NH_2)_2$ และ NH_3 จำนวน 0.01 โมลาร์ 0.05 โมลาร์ และ 1.5 โมลาร์ ตามลำดับ สารละลายทั้งหมดถูกเติมจากน้ำปอลดประจุลงในบีกเกอร์จนมีปริมาตรทั้งหมด 150 ml ในโครงการพิเศษนี้ได้มีการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งในที่สุดได้เลือกใช้ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งในที่สุดได้เลือกใช้ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง ดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4 \cdot \frac{8}{3}H_2O$), เกลือซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$), ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) และแอมโมเนีย (NH_3) ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 6.1 โดยมีอัตราส่วนผสมเป็น $x=0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ
2. ละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟตและซิงค์ซัลเฟตในแอมโมเนียซึ่งมีปริมาตร 16.8 ml เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายไทโอยูเรียในน้ำปอลดประจุประมาณ 10 ml เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง
4. นำแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ที่ติดอยู่กับแท่นยึดซึ่งทำจากเทฟลอนใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอลดประจุอยู่ประมาณ 150 ml ซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำที่มีอุณหภูมิ $80^{\circ}C$
5. เทสารละลายที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 2 ลงในบีกเกอร์ แล้วเทสารละลายที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3 ตามลงไปหลังจากนั้นหมุนแท่นยึดแผ่นรองรับ ตลอดเวลาด้วยอัตราเร็วประมาณ 60 รอบ/นาที ทำการวัดค่า pH ของสารละลายในบีกเกอร์ซึ่งมีค่าประมาณ 11.6 และปล่อยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง โดยควบคุมให้อัตราการหมุนแท่นยึดแผ่นรองรับ และอุณหภูมิของอ่างน้ำคงที่
6. หลังจากเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง แล้วนำแผ่นรองรับที่ติดอยู่กับแท่นยึดออกจากสารละลายจะปรากฏเป็นฟิล์มบางเคลือบบนแผ่นรองรับ และปรากฏอนุภาคของแคดเมียมซิงค์ไฟต์บางส่วนที่จับกันเป็นก้อนเล็กขนาดไมโครเมตร คล้ายผงฝุ่นเกาะอยู่ที่ผิวหน้าฟิล์มบาง
 7. นำแผ่นของรองรับที่ติดอยู่ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุอยู่ประมาณ 200 ml แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิคใช้เวลาประมาณ 15 นาที เปลี่ยนน้ำในบีกเกอร์แล้วทำการเขย่าอีกครั้งหนึ่งประมาณ 20 นาที
 8. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาทำการเป่าให้แห้งโดยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
 9. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบซ้ำอีก 2 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-8
 10. เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 1-9 ให้ได้ประมาณ 100 ชิ้น เพื่อยืนยันผลการทดลอง
 11. นำฟิล์มทุกอัตราส่วนผสม (x) ที่เตรียมได้มาทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ตามลำดับ ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที
 12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อฟิลลิปป์ โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน $\text{CuK}\alpha$ มีค่าเท่ากับ 1.5418 \AA ความต่างศักย์ 30 kV และกระแสไฟฟ้า 25 mA
 13. นำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและวัดความหนาของฟิล์มโดยการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 โดยใช้กระแส 300 μA ความต่างศักย์ 25 kV กำลังขยาย 50,000 ถึง 60,000 เท่า และศึกษาคุณสมบัติทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อหาค่าประกอบของอะตอมของ ธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS
 14. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV-JUSCO 7600 Spectrometer) และใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 nm เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
 15. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้นโดยใช้กระแส 0.05-0.09 μA ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน และไม่มีการฉายแสง เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (อัตราส่วนผสม $x=0$) พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายในบีกเกอร์ จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีหลังจากเติมไทโอยูเรียลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายของเกลือแคดเมียมซัลเฟต แอมโมเนีย และน้ำปลอດประจุ โดยสารละลายจะปรากฏเป็นสีขาวขุ่น แล้วเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนขุ่น และเป็นสีเหลืองอย่างรวดเร็วใช้เวลาประมาณ 50-60 วินาที และหลังจากจุ่มครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว เมื่อนำฟิล์มขึ้นมาจากสารละลายสังเกตพบว่ามีอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์บางส่วนที่จับตัวเป็นก้อนคล้ายฝุ่นผง เกาะอยู่ที่ผิวฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์จำนวนมากจนเกือบทั่วแผ่นแต่หลังจากเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแล้วเป่าให้แห้งจะสังเกตพบว่า ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ มีสีเหลืองมีลักษณะโปร่งแสงติดแน่นกับกระจกสไลด์ และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า เนื้อฟิล์มบางเคลือบติดสม่ำเสมอดีดังแสดงในรูปที่ 6.2 นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type)



รูปที่ 6.2 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยการเคลือบ 3 ครั้ง

6.3.2 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ที่เตรียมได้

โดยการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับพบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นช้ากว่าฟิล์มบาง CdS เล็กน้อยโดยตอนแรกสีของสารละลายมีลักษณะขุ่น และกลายเป็นสีเขียวอ่อนขุ่นเล็กน้อยและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มอ่อนๆ มีเกลดสีขาวลอยอยู่บนผิวหน้าของสารละลายเพียงเล็กน้อย โดยสันนิษฐานว่าน่าจะเป็น ZnS หรือ $Zn(OH)_2$ บางส่วนที่แยกออกมาและในการทดลองพบว่า ความเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของ Zn ที่ใช้ในการทดลองแต่ละเงื่อนไข กล่าวคือ ถ้ามีเปอร์เซ็นต์ของ Zn มากขึ้นความเร็วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้าลง ลักษณะของฟิล์มที่เคลือบติดบนกระจกสไลด์นั้นพบว่า มีตะกอนเกาะอยู่บนผิวฟิล์มแต่น้อยกว่าฟิล์ม CdS และหลังจากเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิค และเป่าให้แห้งแล้ว สังเกตพบว่า ฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ มีสีเหลืองออกส้ม ยึดติดกระจกได้ดี และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ก็พบว่ามีความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มดี แสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มต่างๆ นอกจากนี้ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น เนื่องจากในโครงการพิเศษนี้ได้เตรียมฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขต่างเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการสะดวกและเหมาะสมจึงจัดแบ่งการพิจารณาแยกออกเป็นกลุ่ม โดยกำหนดให้เป็นฟิล์มบางในตระกูลต่างๆ ดังนี้

Zn 20 มีอัตราส่วนผสม $x=0.2$

Zn 40 มีอัตราส่วนผสม $x=0.4$

Zn 60 มีอัตราส่วนผสม $x=0.6$

Zn 80 มีอัตราส่วนผสม $x=0.8$



รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x= 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 फिल्मบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อแอนนिलที่อุณหภูมิต่างๆ

ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เมื่อมีการแอนนिलที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที สีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนไปเป็นสีเหลืองเข้มจนถึงเป็นสีส้ม และความเป็นมันวาวลดลง ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากอะตอมของซัลเฟอร์ระเหิดออกจาก ผิวหน้าของฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 6.4



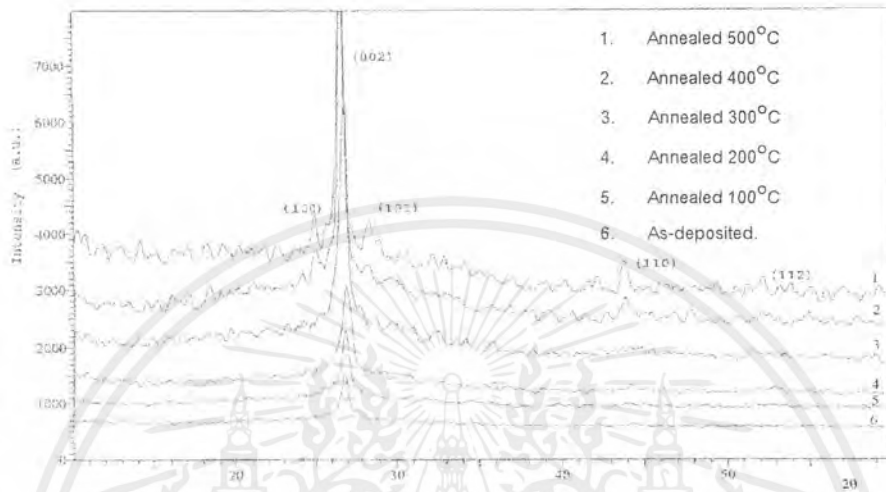
รูปที่ 6.4 แสดงฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อมีการแอนนिलที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

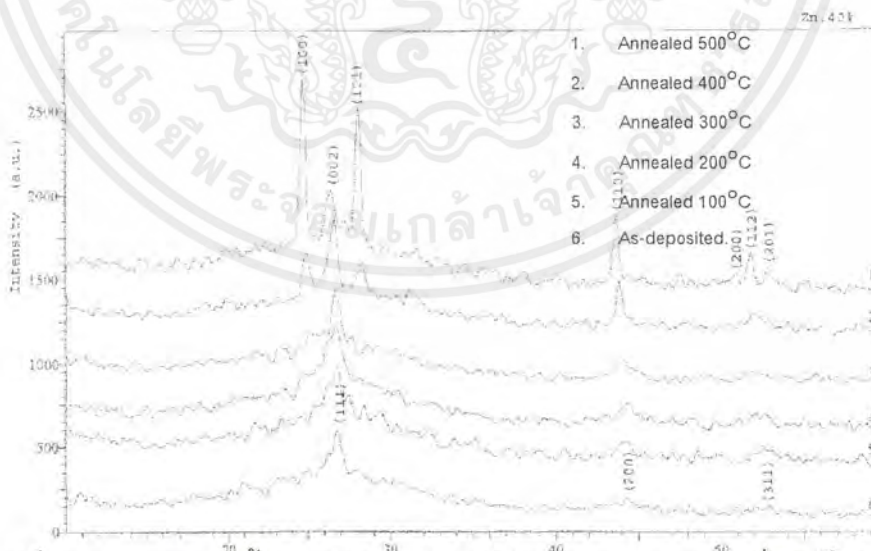
6.4 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์[4]

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกใส ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เพื่อดูลักษณะของพีคที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานของ CdS, ZnS และ $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อดูว่าฟิล์มบางบนกระจกใสที่เราเตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด พิจารณาจากรูปที่ 6.5 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยไม่ได้แอนนีกัลจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิกผลึกพหุพันธ์ส่วนใหญ่เรียงตัวในทิศตั้งฉากกับระนาบ (111) แต่อาจจะมีเฟสของเอ็กซะโกนอลปะปนอยู่บ้างแต่เชื่อว่ามีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงแสดงว่ากระบวนการการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) จะเด่นกว่ากระบวนการการตกผลึกแบบเฮเทโรจีเนียส (heterogeneous) เมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ $400^{\circ}C$ สังเกตพบว่า โครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงโดยสังเกตได้จากพีคที่ ปรากฏมี 3 พีค ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากระนาบ (100), (002) และ (101) นอกจากนี้ยังมีพีคของระนาบ (110) และ (112) ที่แสดงให้เห็นว่าเป็นลักษณะของโครงสร้างแบบเอ็กซะโกนอล ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลประมาณ $400^{\circ}C$ โครงสร้างผลึกจะมีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเอ็กซะโกนอล พิจารณารูปที่ 6.6 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $100 - 500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มบางที่แอนนีกัลที่อุณหภูมิต่ำกว่า $400^{\circ}C$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก แต่ที่อุณหภูมิแอนนีกัลสูงกว่า $400^{\circ}C$ พบว่า โครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกไปเป็นแบบเอ็กซะโกนอล ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับที่มีผู้รายงานไว้ [4,19,20] พิจารณารูปที่ 6.7 เป็นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที สังเกตพบว่าจะได้เป็นฟิล์มบางที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเอ็กซะโกนอลคือจะปรากฏพีคเด่นที่ระนาบต่างๆ เหล่านี้ ได้แก่ (100), (002) และ (101) นอกจากนี้พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของ x เพิ่มขึ้น ความเข้มของพีค (002) จะลดลง ส่วนความเข้มของพีค (100) และ (101) จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกของ ZnS มาตรฐาน (JCPDS 79-2204) จะพบว่า พีคที่ (002) จะมีค่าความเข้มน้อยกว่า พีค (100) และ (101) จึงเป็น

การยืนยันได้ว่าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เราเตรียมได้นั้นได้มีอะตอมของธาตุ Zn เจือปนเข้าไปอยู่ในฟิล์มจริง

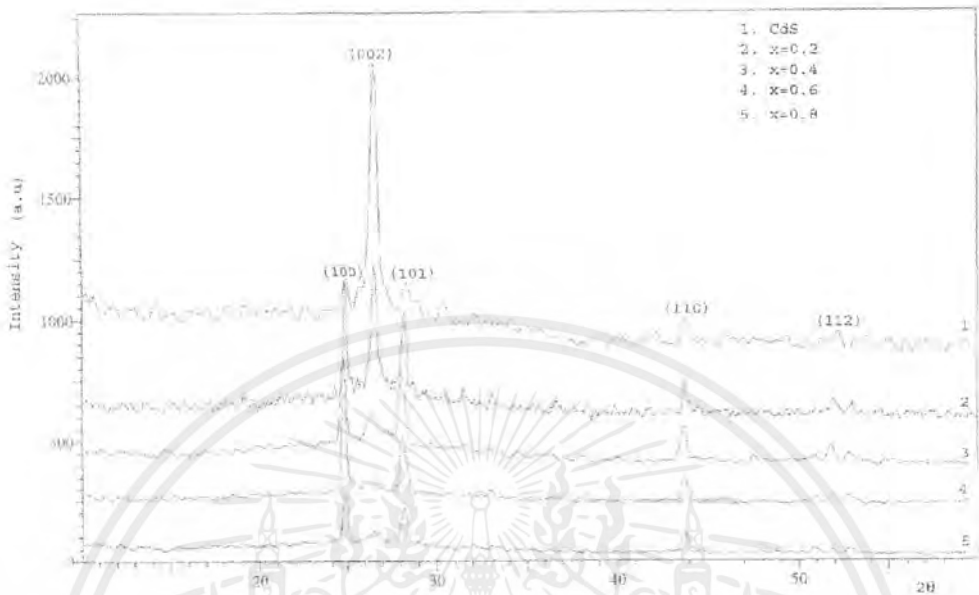


รูปที่ 6.5 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 - 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.6 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x = 0.4$ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 - 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



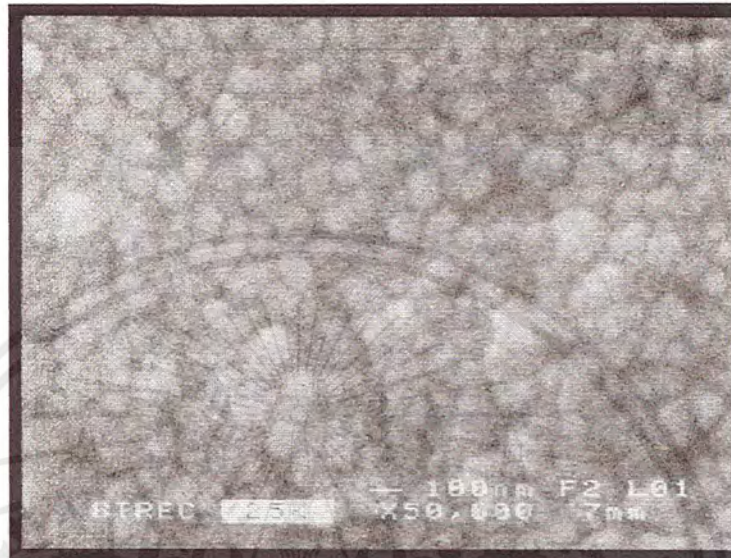
รูปที่ 6.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

6.5 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS[4]

ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM เพื่อดูลักษณะของผิวหน้าในโครงการพิเศษนี้ได้เลือกฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัล 300 และ $400^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ตามลำดับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400) ความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากับ 25 kV และใช้กระแสไฟฟ้า 300 μA มีกำลังขยาย $50,000$ และ $60,000$ เท่า ฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์สัลไฟด์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีพอสมควร ดังนั้นจึงไม่ต้องฉาบผิวหน้าด้วยฟิล์มของทองคำ พบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะการจัดเรียงตัวกันของเกรนจะมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และมีขนาดเกือบเท่ากัน นอกจากนี้ลักษณะของขอบรอยต่อของเกรนมีความคมชัดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิแอนนัลโครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.8-6.10 และจากการถ่ายภาพภาคตัดขวาง (cross-section) ของกระจกสไลด์ ที่มีฟิล์มบางเคลือบอยู่เพื่อวัดความหนาด้วยการถ่ายภาพ SEM ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีสที่เตรียมได้จากการเคลือบ 3 ครั้ง พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาประมาณ 260 nm ดังรูปที่ 6.11

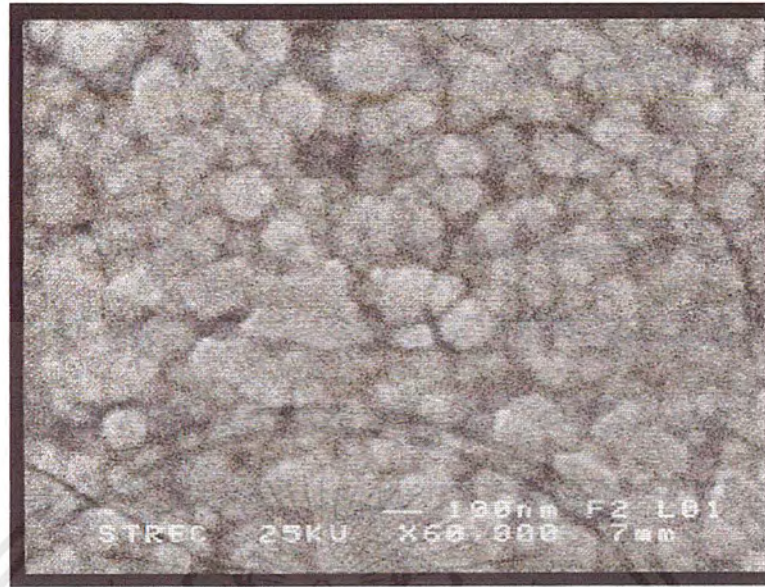


รูปที่ 6.8 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีส และใช้กำลังขยาย 60,000 เท่า



รูปที่ 6.9 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที และใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



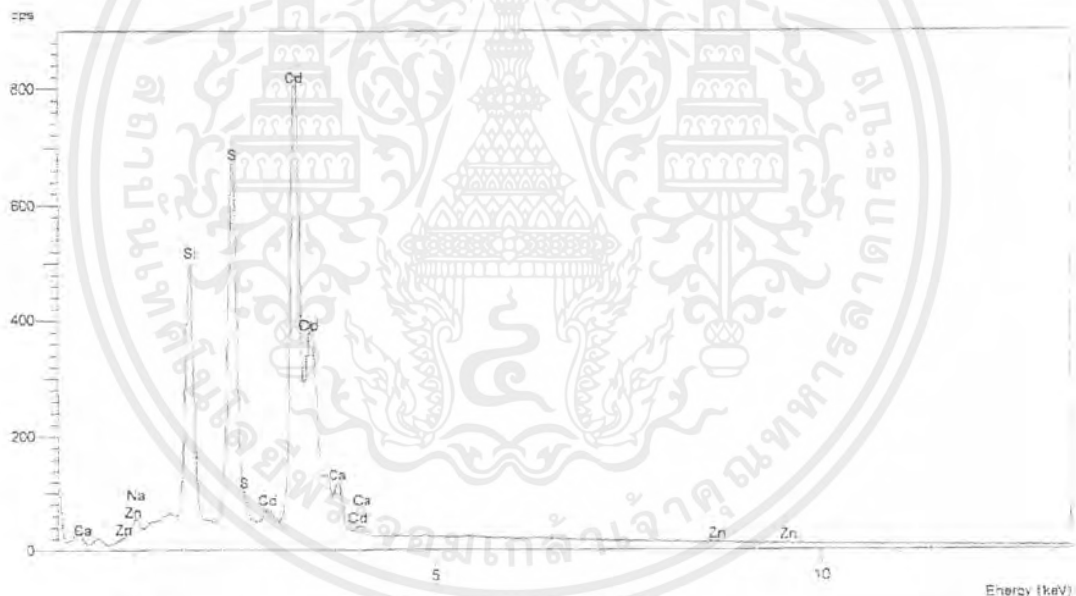
รูปที่ 6.10 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และใช้กำลังขยาย 60,000 เท่า



รูปที่ 6.11 แสดงการวัดความหนาด้วยการถ่ายภาพ SEM ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ เมื่อไม่มีการแอนนีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้เทคนิค EDS สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังแสดงในรูปที่ 6.12 และตารางที่ 6.2 จากการศึกษาสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของอะตอมของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์เชิงคุณภาพพบว่าฟิล์มบางที่เคลือบได้ประกอบด้วยอะตอมของธาตุเหล่านี้คือ Cd, Zn และ S จึงเป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ จริง นอกจากนี้พบว่ายังมีอะตอมของธาตุอื่นๆ คือ Na, Ca และ Si ปะปนอยู่ในผลการวิเคราะห์ด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากอะตอมของธาตุต่างๆ เหล่านี้เป็นองค์ประกอบของกระจกสไลด์ที่ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของอะตอมของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เคลือบบนกระจกสไลด์

เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของธาตุ Zn ที่เจือเข้าไปในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าปริมาณของอะตอมของธาตุ Zn ที่เจือเข้าไปจะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ Cd น้อยมาก และเมื่ออัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสม (x) เพิ่มขึ้นปริมาณของอะตอมของธาตุ Zn จะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุ Cd มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.2

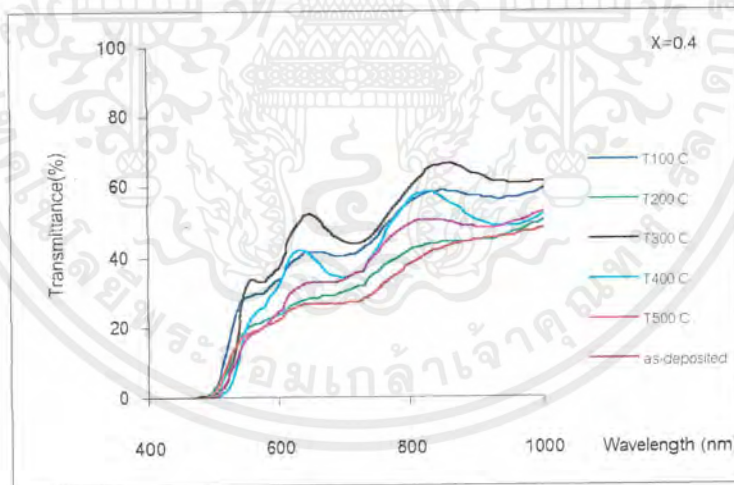
ตารางที่ 6.2 แสดงค่าโมลเปอร์เซ็นต์ (mole percent) ของอะตอมของธาตุ Zn ที่ถูกเจือเข้าไปในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเทคนิค EDS

สารตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ของอะตอม Zn	
	ในสารละลายตั้งต้น	ปรากฏในฟิล์มบาง
Zn20	20	0.25
Zn40	40	0.35
Zn60	60	0.50
Zn80	80	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

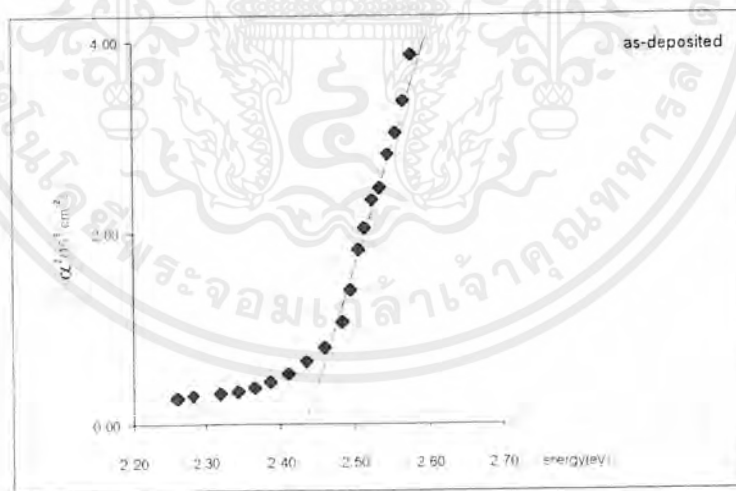
6.6 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน[4]

เมื่อทำการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางตระกูล Zn40 ที่มีความหนาประมาณ 260 nm ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัล และมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ด้วยเครื่อง ยูวี จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 400-1000 nm พบว่าฟิล์มบางเมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล จะมีแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm สามารถส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางได้ และพบว่าสำหรับฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที จะมีแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 510 nm สามารถส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางได้ และขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge) จะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่มีค่ามากขึ้น แต่ถ้าเป็นฟิล์มบางที่มีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที จะพบว่าขอบของการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางค่าความยาวคลื่นที่สั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางตระกูล Zn40 ที่เตรียมได้ทั้งหมดมีความสามารถในการส่งผ่านแสงได้มากกว่า 40% ดังแสดงในรูปที่ 6.13

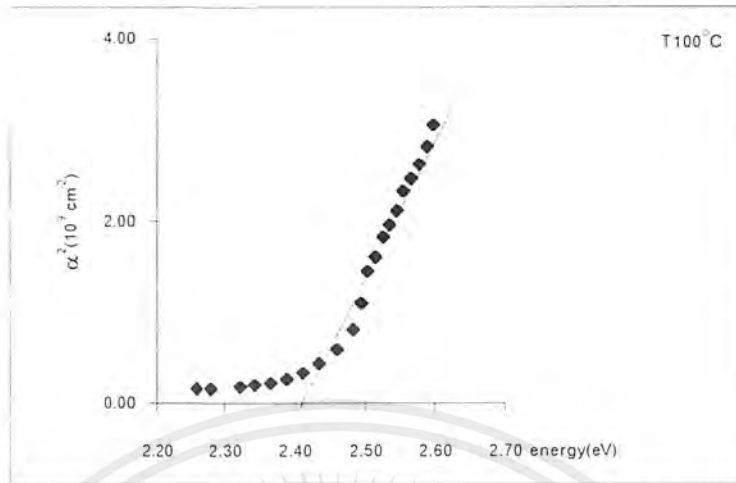


รูปที่ 6.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่าเท่ากับ 400-1000 nm ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

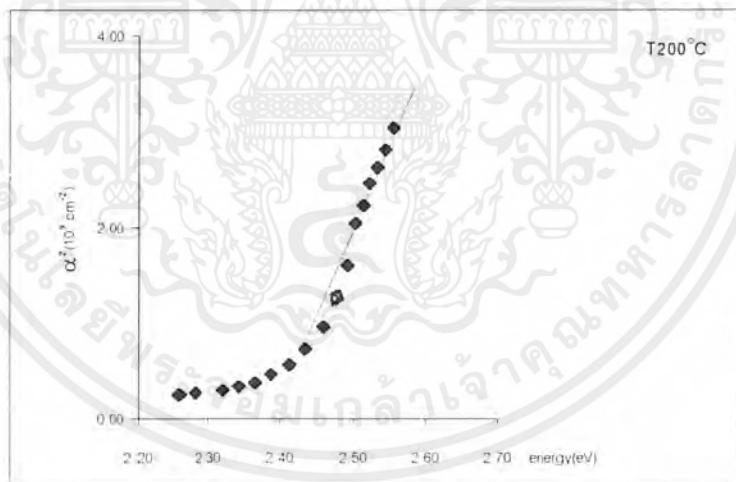
ต่อจากนั้นเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 6.13 มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง (α^2) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ดังแสดงในรูปที่ 6.14-6.19 พบว่าฟิล์มบางตระกูล Zn40 ที่เตรียมได้ทั้งหมดจะแสดงกราฟเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นการแสดงว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน เท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จึงมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแบบไม่มีกระบวนการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องจึงเป็นการแสดงว่าฟิล์มบางตระกูล Zn40 ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่สามารถหาได้จากการลากเส้นตรงโดยประมาณ (approximation) ต่อส่วนที่แสดงกราฟแบบเชิงเส้นไปตัดแกนพลังงานโฟตอนจุดตัดกราฟที่ได้คือ ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานซึ่งพบว่า มีขนาดต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวเล็กน้อยดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.3 และดังแสดงในรูปที่ 6.20 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิของการแอนนัลเพิ่มขึ้นจาก 100-400°C ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงแต่เมื่ออุณหภูมิของการแอนนัลเพิ่มขึ้นเป็น 500°C ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้ [4,19,20]



รูปที่ 6.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของเป็นฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อไม่มีการแอนนัล(as-deposited)

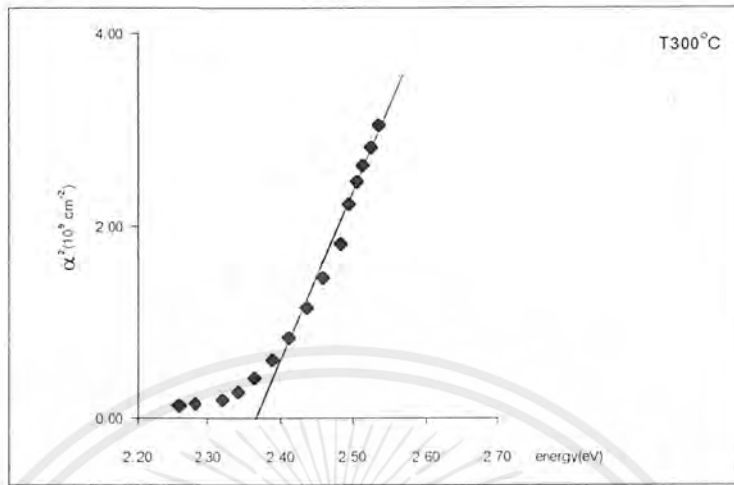


รูปที่ 6.15 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

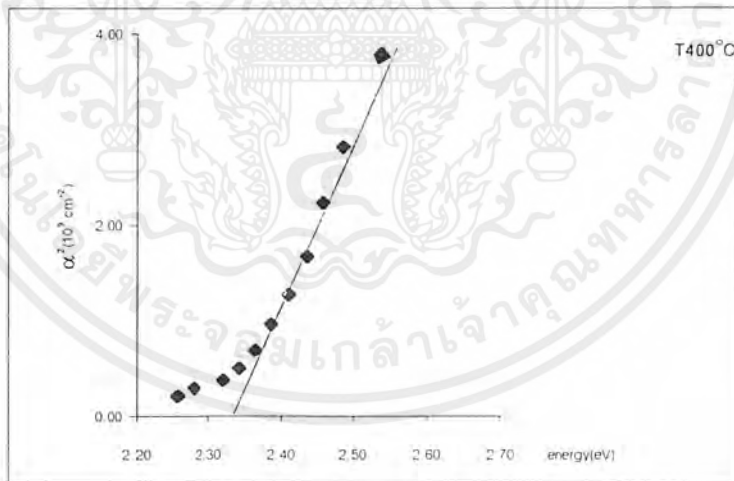


รูปที่ 6.16 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

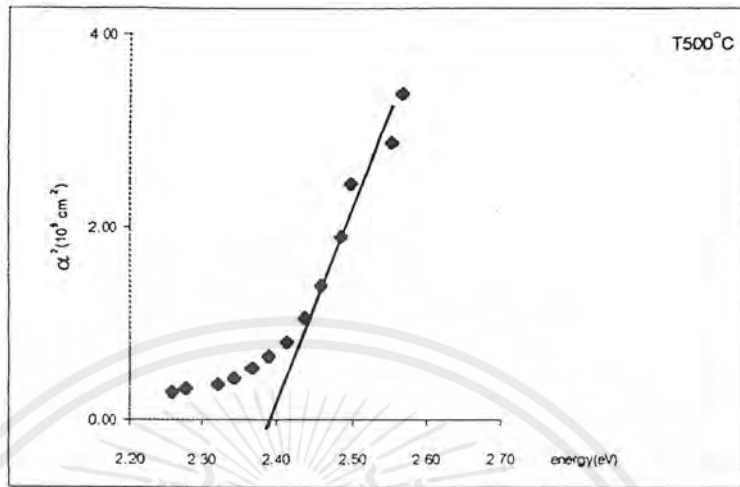


รูปที่ 6.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน (hV) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

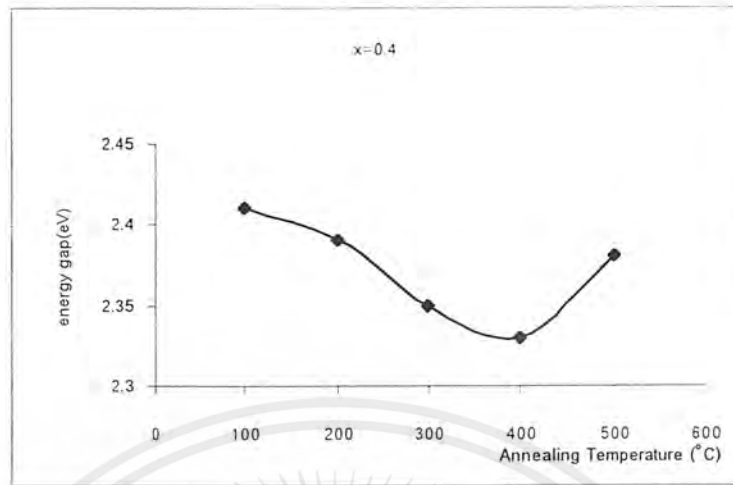


รูปที่ 6.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางตระกูล Zn40 เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางตระกูล Zn40 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิที่แอนนีกัล($^\circ\text{C}$)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) (eV)
As-deposited	2.43
100	2.41
200	2.39
300	2.35
400	2.33
500	2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางตระกูล Zn₄₀ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิแอนนีย์ล

ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (หน่วยเป็น eV) ของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่อัตราส่วนผสม (x) และที่อุณหภูมิแอนนีย์ลค่าต่างๆ

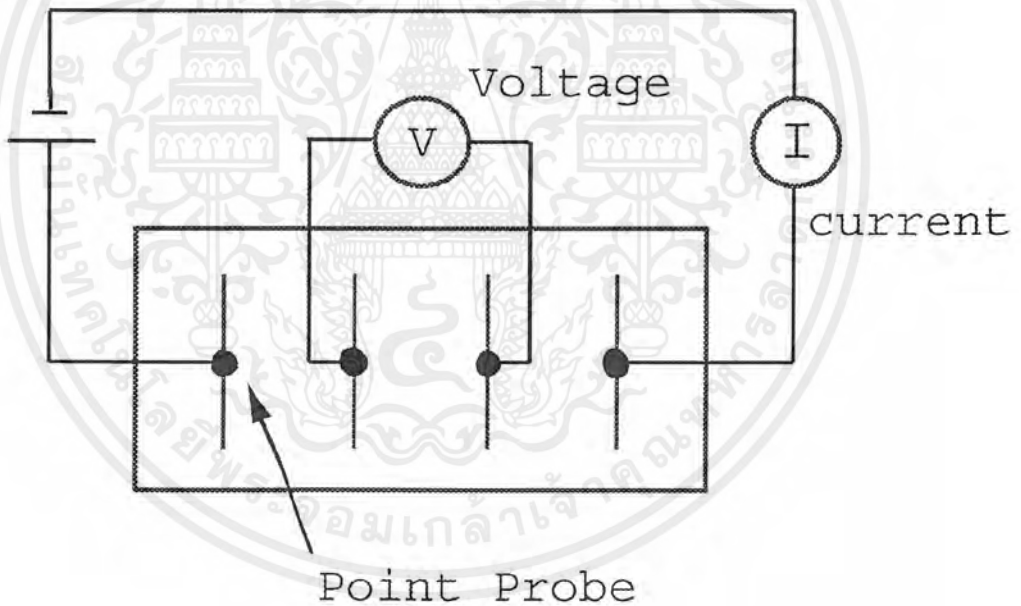
อัตราส่วนผสม (x)	ไม่ได้แอนนีย์ล	อุณหภูมิแอนนีย์ล				
		100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
X=0.0	2.43	2.42	2.40	2.36	2.32	2.34
X=0.2	2.41	2.39	2.37	2.35	2.33	2.36
X=0.4	2.43	2.41	2.39	2.35	2.33	2.38
X=0.6	2.42	2.41	2.39	2.34	2.32	2.39
X=0.8	2.42	2.41	2.37	2.35	2.33	2.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 วิธีการทดลองและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น

6.7.1 อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แหล่งจ่ายไฟ 30 โวลต์
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอดฮาโลเจน 500 วัตต์
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 6.21 แสดงการวัดหาค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

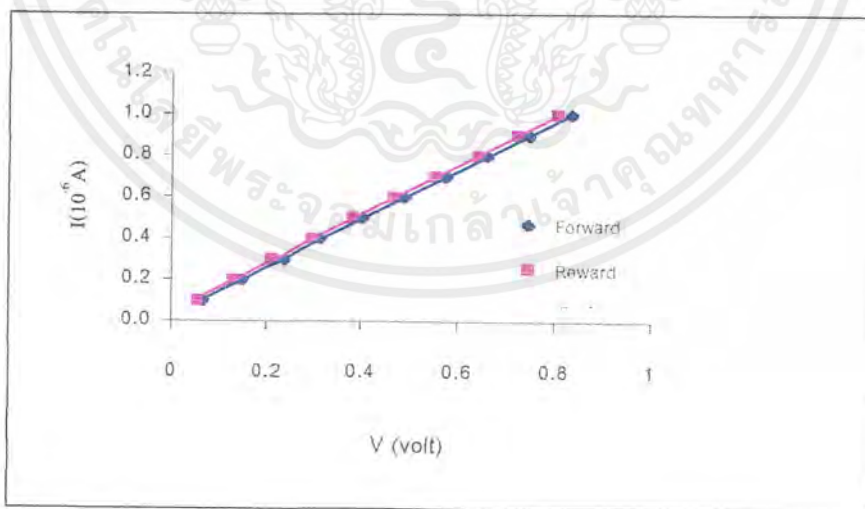
6.7.2 วิธีการทดลอง

- นำฟิล์มบาง CdS และ $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที มาทำรอยต่อโดยใช้กาวยินนำไฟฟ้า แต้มบนผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยแบ่งระยะห่างระหว่างจุดที่แต้มให้เท่ากันจำนวน 4 จุด
- ต่อวงจรดังรูปที่ 6.21
- จ่ายกระแสให้แก่วงจรแล้ววัดค่าแรงดันที่ได้ โดยทำการวัดทั้งหมดประมาณ 10 ค่า ซึ่งกระแสที่จ่ายควรมีค่าน้อย ๆ เช่น $0.1 \mu A, 0.2 \mu A, 0.3 \mu A \dots$ เป็นต้น
- ทำการทดลองเหมือนข้อ 3 แต่สลับขั้วแหล่งจ่ายกระแส (reverse bias)
- ทำซ้ำข้อ 3 และ 4 แต่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2 ให้กับฟิล์มบาง
- นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

พิจารณารูปที่ 6.22 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนีสขณะที่ไม่มีการฉายแสง ความชันของเส้นกราฟขณะไบอัสตรงและไบอัสกลับมีค่าเท่ากัน แสดงว่ารอยต่อไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส อีกทั้งการวัดความต่างศักย์ที่ขั้ว 2 และ 3 เป็นการหลีกเลี่ยงผลของรอยต่อที่ขั้ว 1 และ 4 พิจารณารูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนีสขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2 ความชันของเส้นกราฟขณะฉายแสงมีค่ามากกว่าขณะไม่มีการฉายแสง แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการฉายแสงแล้วมีผลให้ความต้านทานลดลง พิจารณารูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิแอนนีส $200-300^{\circ}C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที เมื่ออุณหภูมิแอนนีสสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นซึ่งจะทำให้ปริมาณขอบเขตเกรนลดลงจึงทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง ในขณะที่ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดชนิดแวนแคนซีจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนเมื่ออุณหภูมิแอนนีสประมาณ $300^{\circ}C$ จะมีค่าความต้านทานแผ่นต่ำที่สุด เมื่ออุณหภูมิแอนนีสมีค่าสูงกว่า $300^{\circ}C$

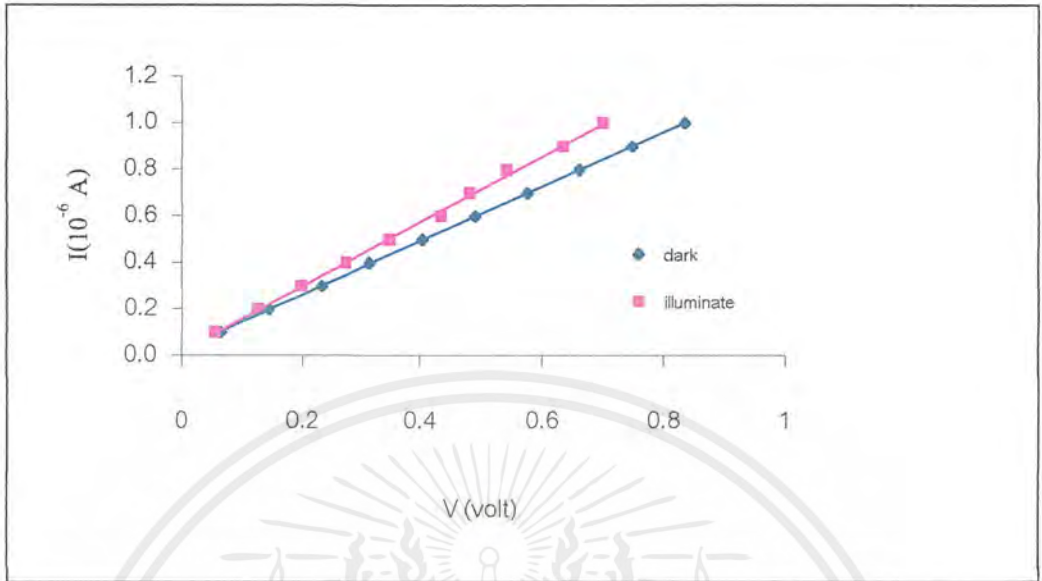
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่า ข้อบกพร่องของผลึกจะมีผลต่อค่าความต้านทานแผ่นมากกว่าที่ข้อบกพร่องของผลึกประพติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นระดับพลังงานลึก [20,21] โดยทั่วไปแล้วข้อบกพร่องผลึกจะเกิดขึ้นเสมอใน CdS ส่งผลให้ CdS มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น เมื่อมีการฉายแสงก็จะเป็นการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดัก ดังนั้นการนำไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอ แต่ข้อบกพร่องใน ZnS น้อยกว่าใน CdS ดังนั้น ZnS จึงไม่ค่อยตอบสนองต่อแสงเนื่องจากพันธะระหว่าง Zn กับ S แข็งกว่าพันธะระหว่าง Cd กับ S ดังนั้น ZnS จึงมีข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดแวนแวนซีน้อยกว่า เมื่ออุณหภูมิแอนเนิลสูงกว่า 400 °C ค่าความต้านทานแผ่นจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก พิจารณารูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ กับอัตราส่วนผสมของ (x) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อ $x=0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อมีการแอนเนิลที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ Zn ใน $Cd_{1-x}Zn_xS$ มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่มีแนวโน้มการตอบสนองต่อแสงลดลง เนื่องจากพันธะระหว่าง Zn กับ S สูงกว่าพันธะระหว่าง Cd กับ S ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระมีจำนวนน้อยลง การตอบสนองต่อแสงจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากจำนวนแวนแวนซีลดลง[4]



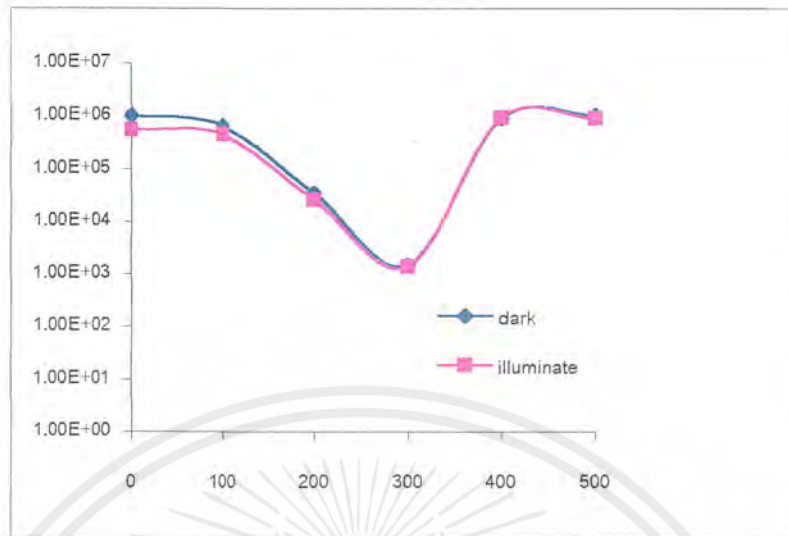
รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนเนิล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

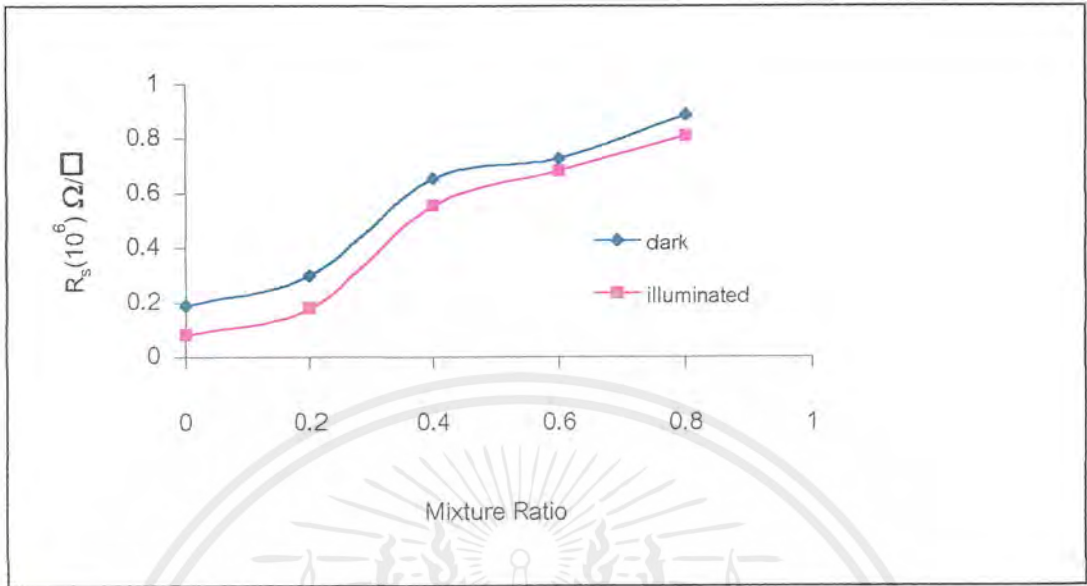


รูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนีกแอนนีกขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีย์ล ของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x=0.4$ ที่เตรียมได้เมื่อมีการแอนนีย์ลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2



รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอัตราส่วนผสม (x) ของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เมื่อมีการแอนนีสที่ $500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วยความเข้ม 6 mW/cm^2

ตารางที่ 6.5 และ 6.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางที่ขึ้นกับอัตราส่วนผสมค่าต่างๆ และขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีส โดยที่การตอบสนองต่อแสง (photo-response) ในตารางที่ 6.5 และ 6.6 คือ อัตราส่วนของความต้านทานแผ่นในขณะไม่ฉายแสงต่อความต้านทานแผ่นขณะฉายแสง ซึ่งปรากฏว่า เมื่ออัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น หรือเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นการตอบสนองต่อแสงจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 6.5 แสดงความต้านทานแผ่นขณะไม่ได้ฉายแสงและขณะมีการฉายแสงของฟิล์มบางที่อัตราส่วนผสมค่าต่างๆ โดยไม่ได้แอนนีสล

อัตราส่วนผสม	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
X=0.0	3.2×10^5	1.5×10^5	2.1
X=0.2	6.7×10^5	3.6×10^5	1.9
X=0.4	1.2×10^5	2.9×10^5	4.1
X=0.6	7.8×10^5	6.0×10^5	1.3
X=0.8	5.3×10^5	2.9×10^5	1.8

ตารางที่ 6.6 แสดงความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางขณะไม่ได้ฉายแสงและขณะมีการฉายแสงที่ขึ้นกับอุณหภูมิของการแอนนีสลของฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนผสม $x=0.4$

อุณหภูมิแอนนีสล ($^{\circ}\text{C}$)	R_s (ไม่ฉายแสง)	R_s (ฉายแสง)	การตอบสนองต่อแสง
As-deposited	1.2×10^6	2.9×10^5	4.1
100	6.8×10^5	8.0×10^4	8.5
200	3.5×10^4	2.4×10^4	1.5
300	1.5×10^3	1.4×10^3	1.1
400	9.6×10^5	9.0×10^5	1.1
500	1.2×10^6	9.4×10^5	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ $Cd_{1-x}Zn_xS$ โดยมีอัตราส่วนผสม $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 โดยใช้เทคนิคการอบสารละลายเคมี ซึ่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ $[CdSO_4 \cdot 8/3H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$, $SC(NH_2)_2$ และ NH_3 โดยมีความเข้มข้น 1×10^{-2} โมลาร์ 5×10^{-2} โมลาร์ และ 1.5 โมลาร์ ตามลำดับถูกนำมาทำปฏิกิริยากันในปิกเกอร์ขนาด 200 ml ซึ่งมี น้ำปอลดประจุ 125 ml แล้วเท $[CdSO_4 \cdot 8/3H_2O] + [ZnSO_4 \cdot 7H_2O]$ ซึ่งทำละลายใน NH_3 ลงก่อน แล้วจึงเท $SC(NH_2)_2$ ที่ละลายในน้ำปอลดประจุตามลงไป จากนั้นใช้น้ำปอลดประจุเติมลงไปจนมีปริมาตรรวมให้ได้ 150 ml ค่า pH ประมาณ 11.6 และอุณหภูมิ 80 °C ทำการหมุนแท่นยึดแผ่นรองรับตลอดเวลาด้วยอัตราเร็ว 60 รอบ/นาที ใช้เวลาในการอบสารละลายเคมี 60 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ตามเงื่อนไขต่างๆทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ $100, 200, 300, 400$ และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมได้มีลักษณะสีเหลืองโปร่งแสงในส่วนฟิล์มบางที่ได้มีการเจืออะตอมของซิงค์เข้าไปจะมีลักษณะสีเหลืองส้มโปร่งแสงที่ผิวหน้าของฟิล์มบางเรียบสม่ำเสมอไม่หลุดลอกง่าย

เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สีของฟิล์มบางเข้มมากขึ้น โดยจะสังเกตได้ชัดเจนกับฟิล์มบางแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 °C ขึ้นไป และเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 °C จะพบอะตอมของซิงค์เฟอร์หลุดมาเกาะที่ปลายหลอดของเตาแอนนีส[4] โดยคิดว่าส่วนใหญ่จะมาจากตะกอนที่เกาะอยู่บนผิวหน้า ส่วนในขั้นตอนของปฏิกิริยานั้นพบว่า เมื่ออัตราส่วนผสม x เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลง สังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของสารละลาย โดยเริ่มแรกจะเป็นสีเขียวขุ่นเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนและเป็นสีเหลืองในขั้นตอนสุดท้าย พบว่าเกิดเกล็ดสีขาวลอยอยู่ด้านบนของสารละลายจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสม x เพิ่มมากขึ้น โดยคาดว่าเกล็ดสีขาวเกิดจากอะตอมของ ZnS หรือ $Zn(OH)_2$ [4,8,22] แต่ในทางกลับกันตะกอนที่เกาะอยู่บนฟิล์มที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์มีน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดเอ็น

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้เชิงจุลภาค ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สังเกตพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนเนลมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบควบิก สำหรับฟิล์มบาง CdS ($x = 0$) ผลึกพหุพันธ์ส่วนใหญ่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนเนลให้สูงขึ้น ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบน (111) จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิแอนเนลสูงกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะปรากฏพีคของระนาบการเลี้ยวเบนจำนวนมากซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล หรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบาง CdS มีการเปลี่ยนเฟสจากควบิกเป็นเฮกซะโกนอลที่อุณหภูมิประมาณ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่สำหรับฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนผสม x ตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไปแม้ว่าฟิล์มบางยังไม่ได้แอนเนลแต่จะปรากฏพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (220) และ (311) นอกเหนือไปจากระนาบ (111) ซึ่งแสดงว่าผลึกจัดเรียงตัวในลักษณะสุ่ม (random) มากขึ้น โดยที่โครงสร้างผลึกยังคงเป็นแบบควบิก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ถึงประมาณ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าโครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากควบิกเป็นเฮกซะโกนอล ในทำนองเดียวกับที่พบใน CdS

จากการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่แอนเนลที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เหมือนกันแต่มีอัตราส่วนผสมต่างกัน พบว่าความเข้มของพีค (002) จะลดลงส่วนความเข้มของพีค (100) และ (101) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{S}$ (JCPDS 49-1302) โดยที่ความเข้มของพีค (002) เป็นครึ่งหนึ่งของพีค (101) โดยประมาณ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่ามีอะตอมของ Zn บางส่วนเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของ CdS

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพ SEM พบว่าเกรนที่ปรากฏจะมีขนาดประมาณ 100 nm และเกรนจะมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบขึ้น เกรนจะมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อได้ทำการแอนเนลที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS จะพบธาตุ Cd, Zn และ S นอกจากนี้ยังพบธาตุ Si, Na และ Ca ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกระจกสไลด์ เมื่อใช้เทคนิค EDS นี้เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสม x ในสารตั้งต้นกับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของ Zn ที่ปรากฏบนเนื้อฟิล์มบางพบว่าในฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีอัตราส่วนผสมของ Zn น้อยมากซึ่งไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์และพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสม x ในสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น อะตอมของ Zn ที่พบในเนื้อฟิล์มก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาการส่งผ่านของแสงพบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอนนัลขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปดังกล่าว อาจเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้ [4,8,20]

- ก. แถบช่องว่างพลังงานของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันย่อมมีค่าแตกต่างกัน
- ข. มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์ จะเกิดส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail)
- ค. ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) หรือขนาดของเกรน

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลจะส่งผลให้ผลของขนาดควอนตัม มีค่าน้อย หรือขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ฟิล์มยังไม่ได้แอนนัล ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากที่สุด เนื่องจากฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็กมากจนกระทั่งผลของขนาดควอนตัม ปรากฏออกมาให้เห็น (ส่วนเหตุผล ข้อ (ก) และ ข้อ (ข) ดูเหมือนจะไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง ที่ได้) อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสจากดิสออร์เดอร์เป็นออร์เดอร์หรือจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล จะเกิดขึ้นที่ $T \approx 400^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C อะตอมต่าง ๆ จะอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ลดปัญหาจากส่วนหางของแถบพลังงาน ซึ่งก็คือ ช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นแม้ว่าผลต่างของช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลยังไม่ทราบค่าแน่ชัด [4,20] แต่เป็นไปได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลมีค่ามากกว่าของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกทั้ง CdS และ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มีอัตราส่วนผสมของ $x = 0.4$ ให้ผลออกมาในแนวเดียวกัน เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของ Zn ในโครงสร้างมีน้อยมากไม่ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานของ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เปลี่ยนไปจากช่องว่างแถบพลังงานของ CdS มากนัก

ความต้านทานแผ่นวัดโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนัลประมาณ 300°C จากนั้นความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มอีกครั้งหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานไว้ [4,18,21,23] ความต้านทานแผ่นอาจจะขึ้นกับปัจจัยอย่างน้อย 3 ประการ โดยประการแรกคือแวกแคชชีของอะตอมซิลเฟอร์ (V_g) ประการที่สองคือ มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์ และประการที่สามคือ ผลของควอนตัมหรือขนาดของเกรน เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนขอบเขตของเกรนจึงลดลงทำให้อิเล็กทรอนิกส์หรือโฮลไหลได้สะดวกขึ้น ส่วนอะตอมที่อยู่ผิดตำแหน่ง จะมีจำนวนลดลงทำให้ส่วนหางของแถบพลังงานลดลง อีกทั้งแวกแคชชีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งการลดลงของอะตอมที่อยู่ผิดตำแหน่งกับการเพิ่มขึ้นของแวกแคชชี จะส่งผลให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นอยู่กับผลของขนาดของเกรน ส่วนการที่อะตอมอยู่ผิดตำแหน่งและแวกแคชชีของอะตอมซิลเฟอร์มีผลน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 300°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นกับอิทธิพลของแวนแดนซีเป็นประการสำคัญ และรวมถึงการที่อะตอมอยู่ผิดตำแหน่งมีจำนวนน้อยลงด้วย จึงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น

ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแต่ละชั้นจะมีค่าลดลงเมื่อมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน แสดงว่าพาหะอิสระซึ่งในที่นี้คืออิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแสงมากระตุ้นให้หลุดออกจากกับดักอิเล็กตรอน ซึ่งแวนแดนซีซัลเฟอร์ประพฤติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอนดังกล่าว อย่างไรก็ตามการตอบสนองต่อแสงจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนหางของแถบพลังงานลดลงจึงทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจากกับดักอิเล็กตรอน (ซึ่งเป็นระดับพลังงานลึก) เคลื่อนย้ายไปยังแถบนำได้น้อยลง[4,8]

ส่วนในกรณีที่อัตราส่วนผสม x เพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะระหว่าง Zn กับ S มีค่าสูงกว่าพันธะระหว่าง Cd กับ S ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระมีจำนวนลดลง เช่นเดียวกับการตอบสนองต่อแสงจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้น สืบเนื่องมาจากจำนวนแวนแดนซีของซัลเฟอร์ลดลง ดังนั้นความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางจึงขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากกว่าชนิดของโครงสร้างผลึก

ปัญหาและข้อเสนอแนะ[4,18]

ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ โดยวิธีออบสารละลายเคมี พบเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุง การทดลองเพื่อให้ผลลัพท์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- คุณภาพของฟิล์มบาง ขึ้นอยู่กับการกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เจือจาง ดังนั้นเวลากัดผิวหน้าต้องระวังไม่ให้กระจกสไลด์ซ้อนทับกัน มิฉะนั้นกระจกสไลด์จะถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
- ขณะที่สารละลายกำลังเกิดปฏิกิริยาเป็นสีเหลือง พยายามอย่าเติมน้ำปอลอดประจุเพื่อปรับปริมาณ เพราะจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด
- กรณีที่ฟิล์มที่เตรียมได้บางมากเกินไป เราสามารถทำการออบด้วยสารละลายเคมีซ้ำอีกครั้งหนึ่งด้วยเงื่อนไขเดิม จึงทำให้ความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น
- ควรมีการศึกษาอัตราเร็วของการเคลือบฟิล์มบาง ที่อัตราส่วนผสม x ต่างๆ เนื่องจากสังเกตพบว่า เมื่ออัตราส่วนผสม x เพิ่มขึ้น ฟิล์มบางที่เตรียมได้ในเวลา 60 นาที เท่ากันจะมีความหนาเพิ่มขึ้น

- ควรใช้สารละลายไฮดราซีน (hydrazine, $\text{NH}_2\text{-NH}_2$) ร่วมกับ NH_3 เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของ Zn ในฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$
- ควรมีการศึกษาผลของการแอนเนลในบรรยากาศของก๊าซอื่นๆ เช่น Ar, H_2S และ H_2+In เป็นต้น ว่ามีต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ หรือไม่อย่างไร
- ควรมีการศึกษาไฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำๆ เนื่องจากวิธีนี้อาจบ่งบอกถึงชนิดของข้อบกพร่องของผลึก
- ควรมีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อทราบข้อมูลที่สำคัญของฟิล์มบางเช่น ความหนาแน่นของพาหะอิสระ, สภาพเคลื่อนไหวได้ (mobility) และชนิดของพาหะอิสระ เป็นต้น



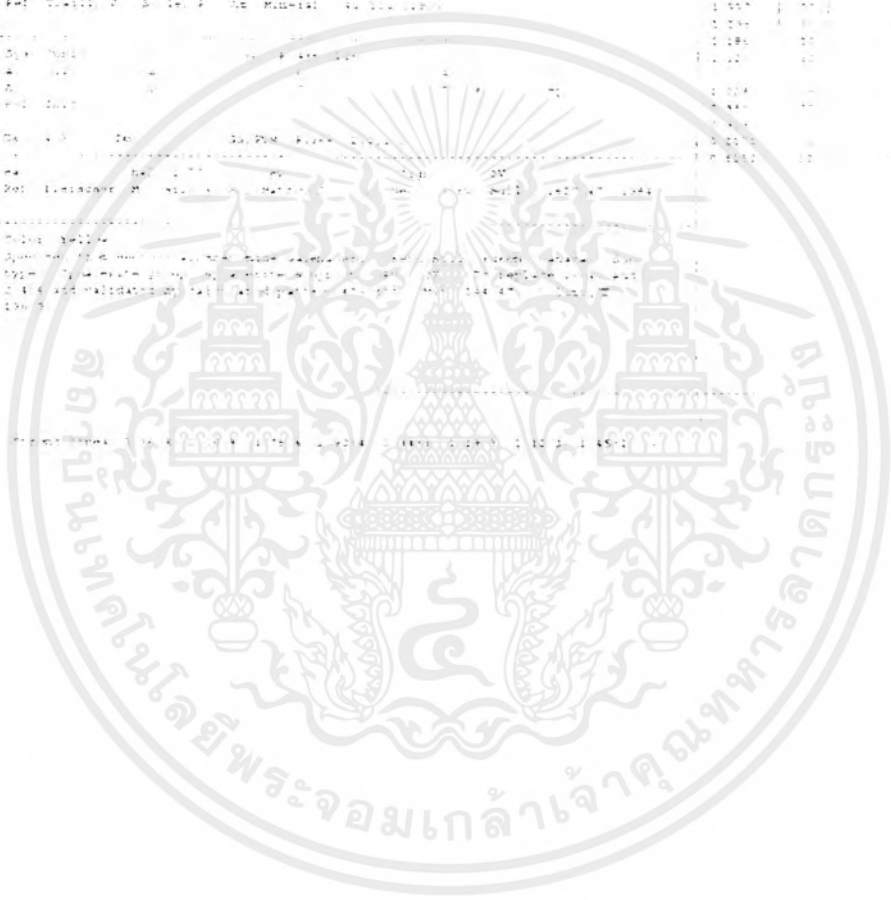
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

Title		DOI/10.17758/DOAJ.2014		DOI/10.17758/DOAJ.2014	
		Quality			
101		101	101	101	101
102		102	102	102	102
103		103	103	103	103
104		104	104	104	104
105		105	105	105	105
106		106	106	106	106
107		107	107	107	107
108		108	108	108	108
109		109	109	109	109
110		110	110	110	110
111		111	111	111	111
112		112	112	112	112
113		113	113	113	113
114		114	114	114	114
115		115	115	115	115
116		116	116	116	116
117		117	117	117	117
118		118	118	118	118
119		119	119	119	119
120		120	120	120	120
121		121	121	121	121
122		122	122	122	122
123		123	123	123	123
124		124	124	124	124
125		125	125	125	125
126		126	126	126	126
127		127	127	127	127
128		128	128	128	128
129		129	129	129	129
130		130	130	130	130
131		131	131	131	131
132		132	132	132	132
133		133	133	133	133
134		134	134	134	134
135		135	135	135	135
136		136	136	136	136
137		137	137	137	137
138		138	138	138	138
139		139	139	139	139
140		140	140	140	140
141		141	141	141	141
142		142	142	142	142
143		143	143	143	143
144		144	144	144	144
145		145	145	145	145
146		146	146	146	146
147		147	147	147	147
148		148	148	148	148
149		149	149	149	149
150		150	150	150	150



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24-1136 Wavelength: 1.5418

ZnCd₉Cd₁S₁₆

2 θ	Int	h	k	l
26.831	100	1	0	0
28.382	65	0	0	2
30.388	100	1	0	1
33.401	40	1	0	2
47.279	70	1	1	0
51.561	65	1	0	3
55.188	10	2	0	0
56.025	45	1	1	2
57.244	15	2	0	1
58.681	41	0	0	4
59.202	8	2	0	2
65.649	41	1	0	4
72.479	20	2	0	3
75.553	8	2	1	0
77.323	16	2	1	1
78.611	2	1	1	4
81.755	14	1	0	5
82.521	6	2	1	2
87.938	8	3	0	0
91.212	12	2	1	3
94.614	2	0	0	6
94.852	8	3	0	2
100.345	6	2	0	5
100.837	4	1	0	6

Wurtzite, cadmium, sym

Rad.: CuK α 1.54058 Filter Mono disp DM

Cut-off Int. Diffract. U_{ref}: 2.00

Ref: Gallagher, McCarthy, Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA, ICDD Grant#-Ard. (1973)

Sys: Hexagonal SG: P6₃mc (186)

a: 3.8411 b: 6.8281 c: 1.6388

Ref: Ibd

Dx: 4.228 Dm: SS.FCM F₁ - 40 (0 0 2) (2)

(002) may be observed as the strongest reflection due to preferred orientation. Wurtzite type, P6₃mc, Mwt: 102.14 Volume[CD]: 80.33

© 1998 JCPDS International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
PCPDFWIN v. 2.02

24-1137 Wavelength: 1.5418

Zn₉Cd₁S₁₆

2 θ	Int	h	k	l
28.489	100	1	1	1
32.879	10	2	0	0
47.313	50	2	2	0
56.151	30	3	1	1
58.556	2	2	2	2
60.176	5	4	0	0
78.443	10	3	3	1
78.764	2	4	2	0
88.075	10	4	2	2
94.953	5	5	1	1
106.679	3	4	4	0
114.037	5	5	3	1

Sphalerite, cadmium, sym

Rad.: CuK α 1.54058 Filter Mono disp DM

Cut-off Int. Diffract. U_{ref}: 5.40

Ref: Gallagher, McCarthy, Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA, ICDD Grant#-Ard. (1973)

Sys: Cubic SG: F43m (216)

a: 5.434 b: c: 5.434

Ref: Ibd

Dx: 4.228 Dm: SS.FCM F₁ - 32 (0 0 1) (12)

Sphalerite type, P6₃mc, Mwt: 102.14 Volume[CD]: 180.48

© 1998 JCPDS International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
PCPDFWIN v. 2.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40-0920 Wavelength= 1.54060

ZnS	2 θ	Int	h	k	l
Zinc Sulfide	26.910895*	1	1	1	
	33.504	60	2	0	0
	48.111490	2	2	0	
	57.107288	3	1	1	
	59.698	17	2	2	2
	70.404	55	4	0	0
	77.833	83	3	3	1
	80.257	13	4	2	0
	89.825	88	4	2	2

Rad.: CuK α 1.54060 Filter: d-sp: Calculated
 Cut-off: 17.7 Int.: Calculated μ cor: 8.44
 Ref.: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)
 Ref.: Yeh, C et al., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 10086 (1992)

Sys.: Cubic S.G.: F $\bar{4}3m$ (216)
 a: 5.345 b: c: A: C:
 Z: 4 mp:
 Ref.: 154

Dx: 4.238 Dm: ICSD # 067790

Peak height/intensity: R factor: 0.000 S: Zn type: PSC: cF8
 Mwt: 97.44 Volume[CC]: 152.70

© 1999 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
 PCPDFWIN v. 2.02

40-1302 Wavelength= 1.5418

(Cd _{0.8} Zn _{0.2})S	2 θ	Int	h	k	l
Cadmium Zinc Sulfide	24.858	99	1	0	0
	26.548	46	0	0	2
	29.227	100	1	0	1
	36.678	27	1	0	2
	43.774	45	1	1	0
	47.909	39	1	0	3
	53.068	6	2	0	0
	51.916	31	1	1	2
	62.898	19	2	0	1
	64.674	3	0	0	4
	68.350	2	2	0	2
	69.933	2	1	0	4
	66.893	10	2	0	3
	63.389	4	2	1	2
	70.995	7	2	1	1
	72.508	4	1	1	4
	75.595	8	1	0	5

Rad.: CuK α 1.5418 Filter: d-sp: Diff
 Cut-off: Int.: μ cor:
 Ref.: Gadave, K., Hankare, P., Lokhande, C., Indian J. Pure Appl. Phys., 31, 654 (1993)

Sys.: Hexagonal S.G.: P6 $\bar{3}mc$ (186)
 a: 4.1375(3) b: c: 6.7158(5) A: C: 1.6202
 Z: [2] mp:
 Ref.: Cell determined by Editor

Dx: 4.505 Dm: SS/FOM: F $\bar{4}3m$ = 146 (C058, 17)

Cd Cl₂, Zn Cl₂ 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. Cell parameters generated by least squares refinement. Reference reports: a=4.14, c=6.715. S: Zn type, PSC: hP4, Mwt: 135.06, Volume[CC]: 99.56.

© 1999 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved.
 PCPDFWIN v. 2.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาว จารุทัศน์ เตชะวิจิตร เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ. 2521 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2540

นางสาว สาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2522 เป็นคนเชียงใหม่ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนศรีอยุธยา และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2540

นาย หัสพร ทองแดง เกิดเมื่อวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2522 เป็นคนชลบุรีโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนพนัสพิทยาคาร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2540

เอกสารอ้างอิง

1. Yamaguchi, T., Yamamoto, Y., Tanaka, T. and Yoshida, A. "Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Films by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Devices" Thin Solid Films 343-344 (1999): 516-519.
2. Dona, J.M., Herrero, J. "Chemical Bath Codeposited CdS-ZnS Film Characterization" Thin Solid Film 268 (1995): 5-12.
3. Yamaguchi, T., Yamamoto, Y., Tanaka, T., Demizu, Y. and Yoshida, A. "(Cd,Zn)S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Devices" Thin Solid Films 281-282 (1996): 375-378.
4. งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_xZn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2543.
5. Torres, J., Cisneros, J.I., Gordillo, G. and Alvarez, F. "A Simple Method to Determine the Optical Constants and Thicknesses of $Zn_xCd_{1-x}S$ Thin Films" Thin Solid Films 289 (1996): 238-241.
6. Oladeji, I.O., Chow, L. "A Study of the Ammonium Salts on Chemical Bath Deposited Zinc Sulfide Thin Films" Thin Solid Films 339 (1999): 148-153.
7. Vadal, J., Vigil, O., Melo, O.D, Lopez, N. and Zlay-Angle, O. "Influence of NH_3 Concentration and Annealing in the Properties of Chemical Bath deposited ZnS Films" Mater. Chem. Phys. 61 (1999): 139-142.
8. O'Brien, P., Mcaleese, J. "Developing an Understanding of the Processes Controlling the Chemical Bath Deposition of ZnS and CdS" J. Mater. Chem. 8 (1998): 2309-2314.
9. Kittel, C. in Introduction to Solid State Physics, 4th ed., pp. 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 611-612, 662-663, 641-676, John Wiley&Sons Inc., New York, 1971.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe_2)", โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.
11. อัมพวรรณ บัวบุตร "รอยต่อโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์", โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539.
12. Cullity, B.D. in Elements of x-ray Diffraction, pp.9-14 Addison-Wesly Publishing Company Inc., 1956.
13. วิรุฬห์ มังคละวิรัช และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน" วารสารเครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม 2534 หน้า 129-165.
14. นฤปวัจก์ เงินวิจิตร "คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้ Electron Probe Microanalysis" เอกสารของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 40-60.
15. สิงหนเดช แดงจวง "การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539.
16. Singh, J. in Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology, Mc Graw-Hill International Editions, 1995.
17. Dona, J.M., Herrero, J. "Process and Film Characterization of Chemical-Bath-Deposited ZnS Thin Films" J. Electrochem. Soc. 141 (1994): 205-210.
18. จักรพันธ์ ทองเจริญ และอภิวัฒน์ กมลทวิกุล "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2542.
19. Ramirez-Ban, R., Sandoval-Inda, N.C., Espinoza-Beltr'an, F.J., Soteda-Lerma, M., Zelaya-Angle, O. and Falcony, C. "Structural Transition of Chemically Deposited CdS Films on Thermal Annealing" J. Phys. Condens. Matter 9 (1997): 10051-10058.
20. Ichimura, M., Goto, F. and Arai, E. "Structural and Optical Characterization of CdS Films Grown by Photochemical Deposition" J. Appl. Phys. 85(10) (1999): 7411-7417.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21. Tomas, S.A., Vigil, O., Alvarado-Gill, J.J., Lozada-Morales, R. and Zelaya-Angel, O., "Influence of thermal annealing in different atmospheres on the band-gap shift and resistivity of CdS thin films" J. Appl. Phys., 78 (1995): 2204-2207.
22. Padiyan, D.P. and Radha, C.A., "Structural, Optical and Electrical Properties of Semiconducting ZnS Thin Film." Bulletin of Electrochemistry 14 (1998): 391-393.
23. Sasikala, G., Thilakan, P. and Subramanian, C. "Modification in the Chemical Bath Deposition Apparatus, Growth and Characterization of CdS Semiconducting Thin Films for Photovoltaic Applications." Sol. Energy Mater.&Sol. Cells" 62 (2000): 275-293.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้