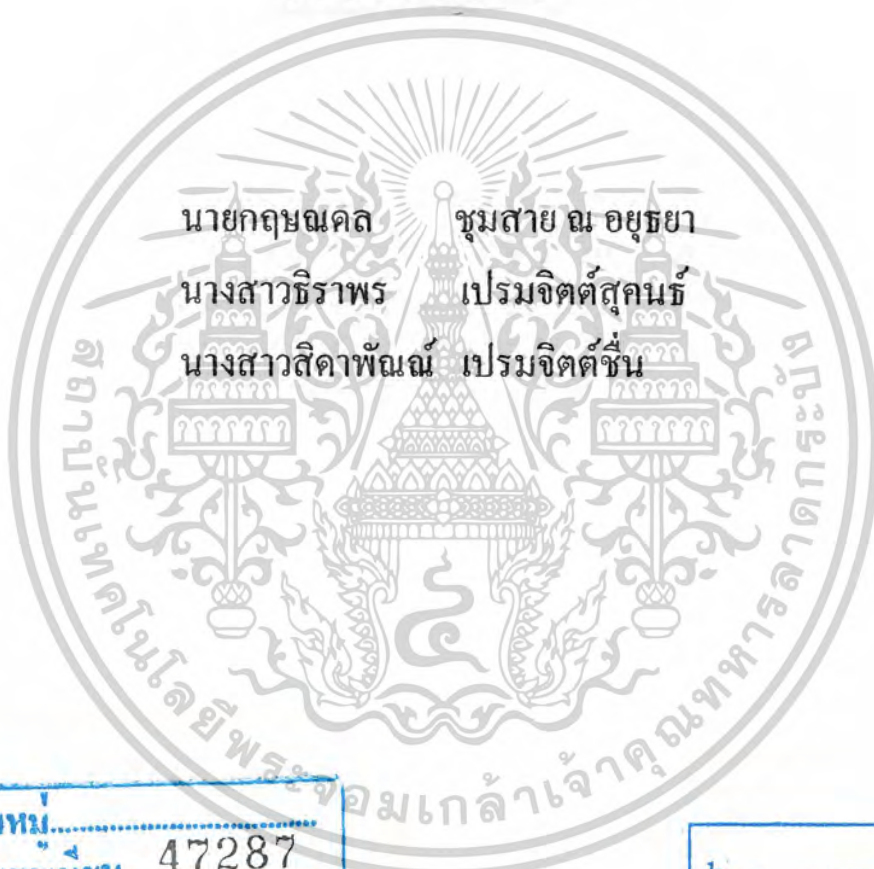


การศึกษาฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของโลหะทรานซิชันบางชนิด



นายกฤษฎคุณ ชุมสาย ณ อยุธยา
นางสาวธีราพร เปรมจิตต์สุคนธ์
นางสาวลิดาพัฒน์ เปรมจิตต์ชื่น

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 47287
วัน, เดือน, ปี..... 27 ส.ย. 2546

b.....
i.....

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of CdS Thin Films Doped Some Transition Elements



Mr. Kritsanadon Chumsainaayutaya

Miss Tiraporn Premchitsukon

Miss Sidapan Premchitchuen

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

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของโลหะทรานซิชันบางชนิด


นักศึกษา นายกฤษณดล ชุมสาย ณ อยุธยา
นางสาวธราพร เปรมจิตต์สุคนธ์
นางสาวสิดาพัฒน์ เปรมจิตต์ชั้น

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

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

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.อนุพงศ์ สว่างโรสภา	
กรรมการ รศ.งามนิตย์ แก้วแดง	
กรรมการ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง	
กรรมการ ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ	


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	การศึกษาฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของโลหะทรานซิชันบางชนิด
นักศึกษา	นายกฤษณคล ชุมสาย ณ อยุธยา นางสาวธราพร เปรมจิตต์สุคนธ์ นางสาวลิดาพัฒน์ เปรมจิตต์ชื่น
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2545
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. จูตินัย แก้วแดง รศ. จามนิตย์ แก้วแดง รศ. ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผศ. ดร. ชัยสิงห์ ภูรัญเกียรติ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยธาตุทรานซิชัน เช่น Cu, Co, Cr, Fe และ Ni โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีโดยเคลือบบนกระจกสไลด์ ซึ่งสารตั้งต้นหลักที่เป็น $CdSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_3 โดยเตรียมที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ ใช้เวลา 60 นาที จากนั้นนำไปแอนนिलที่อุณหภูมิ $100-500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่ความดันประมาณ 1 บรรยากาศ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งจากผลการศึกษาค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ยังไม่ผ่านการแอนนिलพบว่าจะปรากฏฟีกเนื่องจากการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แต่เมื่อมีการแอนนिलที่อุณหภูมิสูงกว่า $400^\circ C$ จำนวนฟีกการเลี้ยวเบนจะเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ส่วนขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและความต้านทานของฟิล์มบาง CdS จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิการแอนนिल ฟิล์มบางที่เจือด้วยอะตอม Ni จะให้การตอบสนองต่อแสงสูงสุด ส่วนฟิล์มบางที่เจือด้วยอะตอม Cu จะให้ค่าดัชนีเชิงคุณภาพสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	A Study of CdS Thin Films Doped Some Transition Elements
Name	Mr. Kritsanadon Chumsainaayutaya Miss Tiraporn Premchitsukon Miss Sidapan Premjitchuen
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics
Academic Year	2002
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang Assoc.Prof. Ngamnit Gaewdang Assoc.Prof.Dr. Tiparatana Wongcharoen Assist.Prof.Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat

Abstract

In this special project, CdS thin films doped with 1% mol of some transition element such as Cu, Co, Cr, Fe and Ni have been deposited on the slide glass substrate by the chemical bath deposition technique at 80 °C for 60 min. The solution in reaction bath consists of CdSO₄, SC(NH₂)₂ and NH₃ in deionized water. The as-deposited film were annealed in N₂ at the temperature ranging from 100-500 °C for 20 min. From XRD patterns, only one diffraction peak which can attributed to (111) diffraction of cubic CdS structure. At annealing temperature higher than 400 °C, many diffraction peaks can be observed which correspond to hexagonal structure. The variation of energy gap and sheet resistance of pure and doped thin films as a function of annealing temperature. The Ni-doped and Cu-doped CdS thin films show the highest photoresponse and figure of merit values respectively

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง ,รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง, รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรกิจเกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมทั้งการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร โอสดจันทร์, ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม รอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี พุฒพัฒน์ และคุณรวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต และตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพพล สุทธิศิริ และอาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์คิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจําใช้ในการทดลอง โครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วงมณฑลชัย รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณกัญญา ศิริโภชน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิซิเบิลแบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ จัสโก้ รุ่น 7800 (UV/visible spectrometer JASCO 7800) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลตและย่านตามองเห็นสำหรับใช้ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร, กล้องโลหะตลับสัญญาณรบกวนและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ , เครื่องกวาดสารละลายเคมี และตู้อบอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องดิจิทัลเพื่อใช้ในการถ่ายรูปและจัดสรรเงินของภาควิชาเพื่อใช้ในการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณวัชรชัย ขาวประเสริฐ และคุณจรินทร์ โพธิไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณวีรชัย ลิภา นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์กวนสารละลายปรับความเร็วรอบได้โดยใช้สเต็ปมอเตอร์และแนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณ นายวิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอขอบคุณ นายณัฐพล บัวเอี่ยม และนายชาญ เชาว์ปฏิภาณ ที่ใช้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม Photoshop

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การอุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

นายกฤษณศล ชุมสาย ณ อยุธยา

นางสาวธิราพร เปรมจิตต์สุคนธ์

นางสาวสิคาพัฒน์ เปรมจิตต์ชื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	12
2.2.1 การเกิดสีของผลึก	13
2.2.2 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิล็กตรอน	15
2.2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	17
2.2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	18
2.2.5 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ CdS	20
2.2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	21
2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	22
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิล็กตรอนและ โฮล	22
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	23
2.3.2.1 วิธีวัด โดยตรง	23
2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	24
2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	26
2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้วหรือสี่ขั้วเชิงเส้น	27
2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้วิธีขั้วความร้อน	29
2.5 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี	30
2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	30
2.5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ	32
2.6 ข้อมูลที่สืบค้นจากผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 วิธีการทดลอง	36
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	36
3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์	38
3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS	38
3.1.4 วิธีการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
4.1.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	42
4.1.2 ฟิล์มบาง CdS ที่มีกรเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆที่เตรียมได้	42
4.1.3 ฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ	43
4.1.4 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	46
4.1.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	50
4.1.6 ผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม ของธาตุทรานซิชันต่างๆ	58
4.1.7 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยธาตุ ทรานซิชันต่างๆ	59
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	66
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก	74
ประวัติ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบ สารละลาย เคมีในบีกเกอร์ที่มีปริมาณของสารละลายเท่ากับ 150 ml	37
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพลังงานช่องว่างแถบพลังงาน(E_g)ของฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni เมื่อไม่ได้มี การแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	57
ตารางที่ 4.2 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	58
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัลขณะที่มี การฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศ ของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	60
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ที่ ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัลขณะที่มีการฉายแสง และขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	60
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ที่ ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	61
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr ที่ ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.7	แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัลขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	62
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัลขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100 – 500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	62
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E _g ของฟิล์มบาง CdS ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu และ Co ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนัล เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	63
ตารางที่ 4.10	แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E _g ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr, Fe และ Ni ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนัลเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 ^o C เป็นเวลา 20 นาที	64

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	4
รูปที่ 2.2 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS	
ก. พันธะโควาเลนต์และพันธะเคตระอีตรอน	
ข. โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	5
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์ของ CdS	6
รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงระนาบอะตอม	
ก. ภายใน โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	
ข. ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	6
รูปที่ 2.5 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	7
รูปที่ 2.6 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค	8
รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี	
ก. ชนิดชอตที	
ข. ชนิดเฟรนเคิล	9
รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	10
รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	11
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ	
ก. ฉนวน	
ข. สารกึ่งตัวนำ	
ค. ตัวนำ	13
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d	14
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T=0^{\circ}\text{K}$)	
ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ($T=0^{\circ}\text{K}$)	
	ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
	ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	17
รูปที่ 2.14	แสดงโครงสร้างแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	17
รูปที่ 2.15	แสดงโครงสร้างแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต	18
รูปที่ 2.16	แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดโดยตรง	23
รูปที่ 2.17	แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	24
รูปที่ 2.18	แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
	ก. แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้นโดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
	ข. แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า	26
รูปที่ 2.19	แสดงลักษณะของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	
	ก. โครงสร้างภายในของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	
	ข. ส่วนประกอบหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นที่สมบูรณ์	27
รูปที่ 2.20	แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน	
รูปที่ 2.21	แสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ	30
	ก. การตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส	
	ข. การตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส	
	ค. การตกผลึกแบบผสม	32
รูปที่ 3.1	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS	37
รูปที่ 3.2	แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	40
รูปที่ 4.1	แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส (as-deposited)	42
รูปที่ 4.2	แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีกรเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เตรียมได้เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	44
รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	44
รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Co เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	44
รูปที่ 4.6 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	45
รูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	45
รูปที่ 4.8 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	45
รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส	46
รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ทั้งในกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	47
รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni ทั้งในกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100- 500 °C เป็นเวลา 20 นาที	48
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450 – 750 nm ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อไม่มีการแอนนียลและเมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที	51
รูปที่ 4.14	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe เมื่อไม่ได้มีการแอนนียลและเมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที	52
รูปที่ 4.15	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr เมื่อไม่ได้มีการแอนนียลและเมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที	52
รูปที่ 4.16	แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co เมื่อไม่ได้มีการแอนนียลและเมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที	53
รูปที่ 4.17	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่ไม่มีการเจือและมีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni เมื่อไม่ได้มีแอนนียล	54
รูปที่ 4.18	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีการเจือและในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Ni และ Fe เมื่อมีการแอนนียลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100°C	54
รูปที่ 4.19	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(ah\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้มีการแอนนียล	55
รูปที่ 4.20	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการเจือเปลี่ยนแปลงความอุณหภูมิแอนนียล เมื่อมีการแอนนียลภายใต้ของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.21 แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการแอนนัลเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที	57
รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe ที่กับอุณหภูมิแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที	64
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเชิงคุณภาพมากที่สุดกับอุณหภูมิแอนนัลทั้งในกรณีที่ไม่มีแสงและที่มีการฉายแสง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที	65



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ สามารถแสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) สามารถแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนกับตัวนำ และสามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้โดยการเจือสิ่งเจือปนของธาตุที่เหมาะสมลงไป จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เราสามารถนำมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มากมาย เช่น ไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) วงจรรวม(integrated circuit) และเซลล์แสงอาทิตย์ (sollar cell) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทันทีที่มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันทีและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพียงติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องสร้างเสียบรรณหรือการเคลื่อนไวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี [1]

ฟิล์มบาง CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ ประมาณ 2.42-2.53 eV [1-3] ซึ่งมีศักยภาพในการประดิษฐ์เป็นไดโอด เปล่งแสง หรือเลเซอร์ไดโอด ในย่านแสงสีเขียวรวมทั้งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ CdS/CuInGaSe₂ ให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงกว่า 16% [2] ซึ่งฟิล์มบางของ CdS จะทำหน้าที่เป็นหน้าต่าง (window) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางของ CdS จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอย่างหนึ่ง

การเตรียมฟิล์มบาง CdS สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น วิธีการสปัตเตอริง, วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ, วิธีการระเหยสารเคมี, วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส และวิธีการอบสารละลาย

เคมี (chemical bath deposition : CBD) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีไม่วากรมณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวิธีที่มีข้อดี คือ สามารถเตรียมสารได้ขนาดใหญ่ตามต้องการ ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมากนัก และยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนักคือประมาณที่ 80-90 °C ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าวิธีอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

การเตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมีนั้นฟิล์มบาง CdS จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเดียมไอออน (Cd^{2+}) กับซัลเฟอร์ไอออน (S^{2-}) ในสารละลาย แล้วไปเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) จากนั้นนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (N_2) โดยการแอนนัลจะทำให้การจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มบาง CdS เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และที่สำคัญจะทำให้สมบัติเชิงฟิสิกส์เปลี่ยนไปโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง [2-8]

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี
2. เพื่อศึกษาการแอนนัลฟิล์มบางที่เตรียมได้ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction)
4. เพื่อศึกษาคูณสมบัติของแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง (optical transmission) แล้วนำมาศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคการใช้ขั้วความร้อน (hot probe)
6. เพื่อศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอาบสารละลายเคมีที่ใช้วิธีนี้เตรียม เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ต้นทุนการผลิตไม่สูงมากจนเกินไป และให้ประสิทธิภาพที่สูง เพื่อจะได้นำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป โดยฟิล์มบาง CdS เจือด้วยอะตอมของธาตุ

ทรานซิชันบางชนิด และศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจือธาตุทรานซิชัน นอกจากนี้ นำ CdS ไปแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการแอนนัล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ต่าง และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni บนกระจกสไลด์โดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีมีความหนาสม่ำเสมอและติดแน่นดีกับกระจกสไลด์
4. ทำการแอนนัลฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที
5. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
6. ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการวัดการส่งผ่านแสงเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
7. ทำการทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการใช้ขั้วความร้อน
8. ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจาก โครงการงานพิเศษนี้ คือ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี
2. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการในการแอนนัลฟิล์มบาง
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS
4. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นบัฟเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

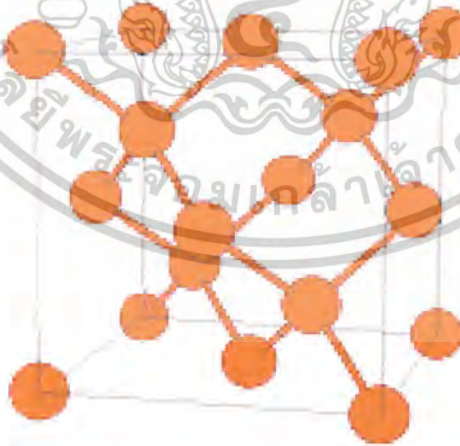
สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า, คุณสมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

2.1 โครงสร้างของผลึก

2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 3 มิติ [9-11]

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกนั้นจากการศึกษาเราพบว่าโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะ โครงสร้างอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ทไซต์ (wurtzite)

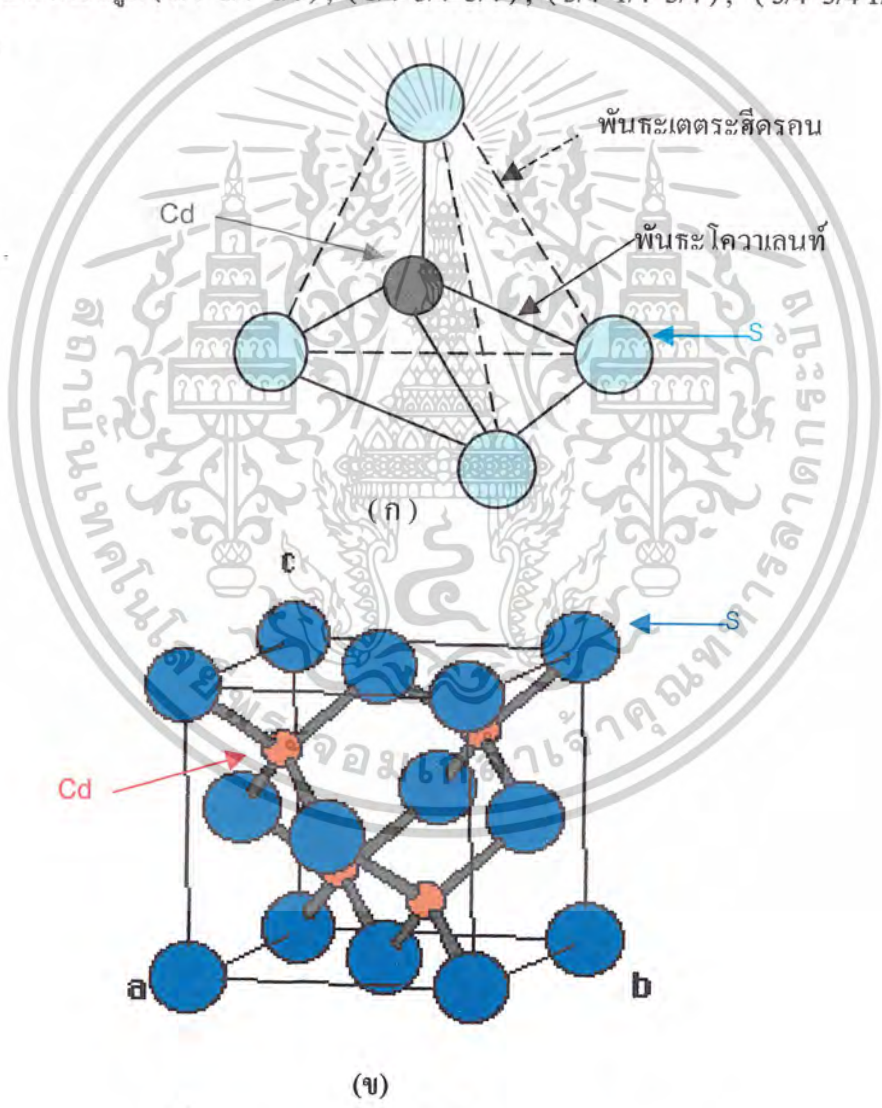
2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [9-11]



รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างนี้จะมีลักษณะคล้าย โครงสร้างผลึกแบบเพชรดังรูปที่ 2.1 โดยมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบ โควาเลนต์และมีพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) แต่จะมีโครงผลึกพื้นฐาน (basic lattice) ที่ $(0\ 0\ 0)$ และ $(\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4})$ เป็นอะตอมของธาตุต่างชนิดกันคั้งนั้น โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จึงเกิดจากการนำโครงสร้างแบบเพสเซนเตอร์คิวบิกสองโครงสร้างมาซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยของเซลล์จะมี 8 อะตอมซึ่งประกอบด้วย อะตอมของธาตุ สองชนิด แต่ละชนิดจะมี 4 อะตอม เช่น ถ้าอะตอมของ Cd จะอยู่ที่ $(0\ 0\ 0)$, $(0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0)$ ตำแหน่งของอะตอม S ก็จะมีอยู่ที่ $(\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4})$ ดังรูปที่ 2.2 (ข)

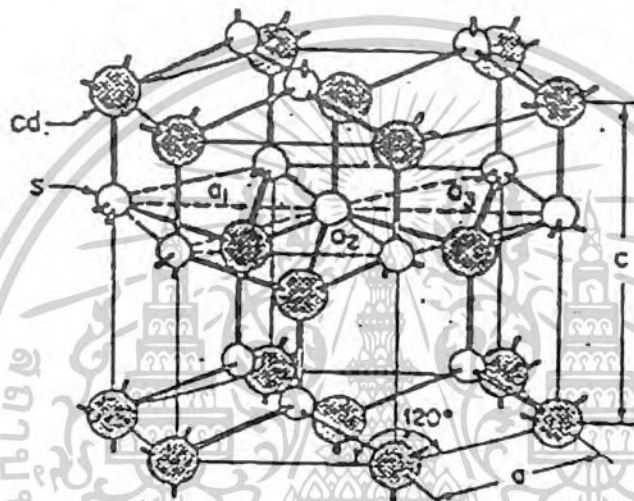


รูปที่ 2.2 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS
 (ก) พันธะ โควาเลนต์และพันธะเตตระฮีดรอน
 (ข) โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

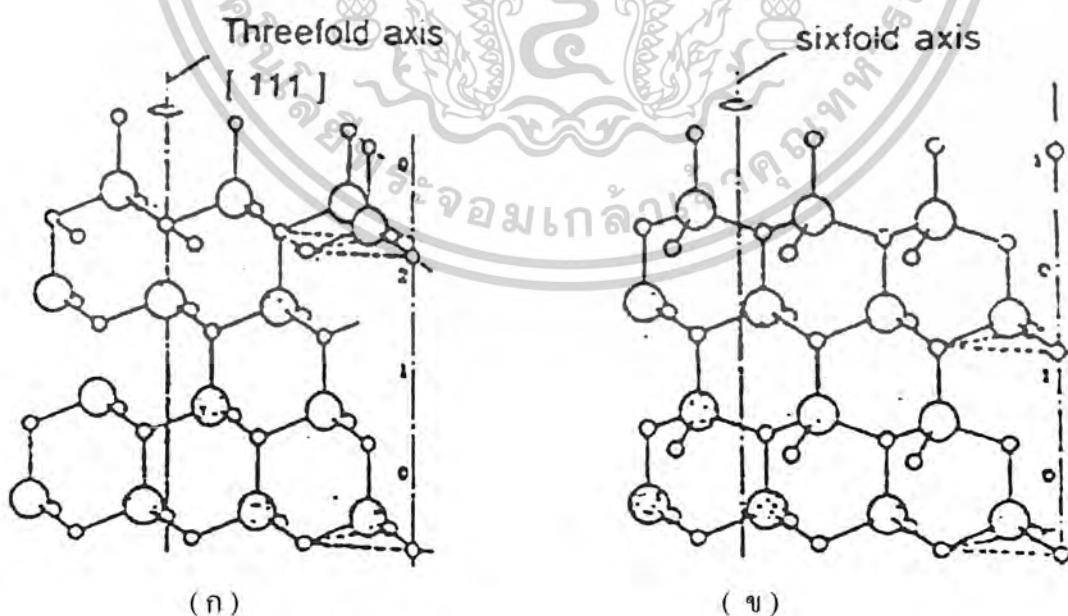
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [9-11]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นี้มีพันธะเคมีของอะตอมในโครงผลึกเหมือนกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึกแต่ละชั้นของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไปดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกนี้เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกย่อยแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close-packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS



รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงระนาบของอะตอม

(ก) ภายในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

(ข) ภายในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกต้องและเป็นประโยชน์เท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คัชนีมิลเลอร์ [9-11]

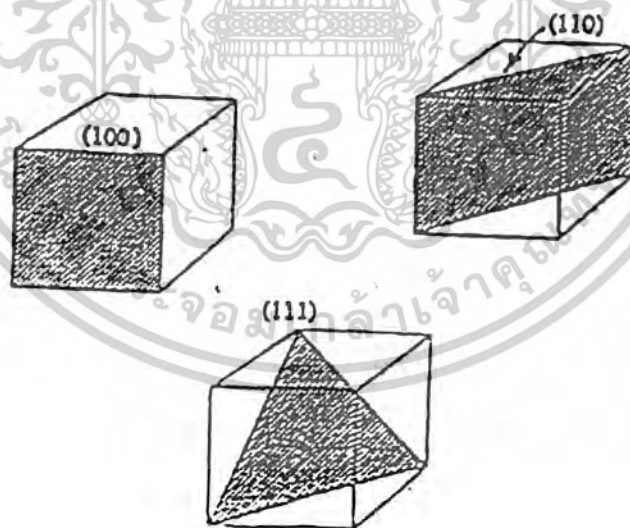
การบอกระนาบต่างๆที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นในรูปของค่าคัชนีมิลเลอร์ ค่าคัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักผลึกศาสตร์ชาวอังกฤษที่ชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยมีการแยกคัชนีมิลเลอร์เป็น 2 ประเภทดังนี้คือ

2.1.2.1 คัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [9-11]

การบอกระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะบอกด้วยค่าคัชนีมิลเลอร์ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (h, k, l)

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

เมื่อ p, q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั่นคือ h, k, l จะเป็นตัวเลขเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือคัชนีมิลเลอร์นั่นเอง

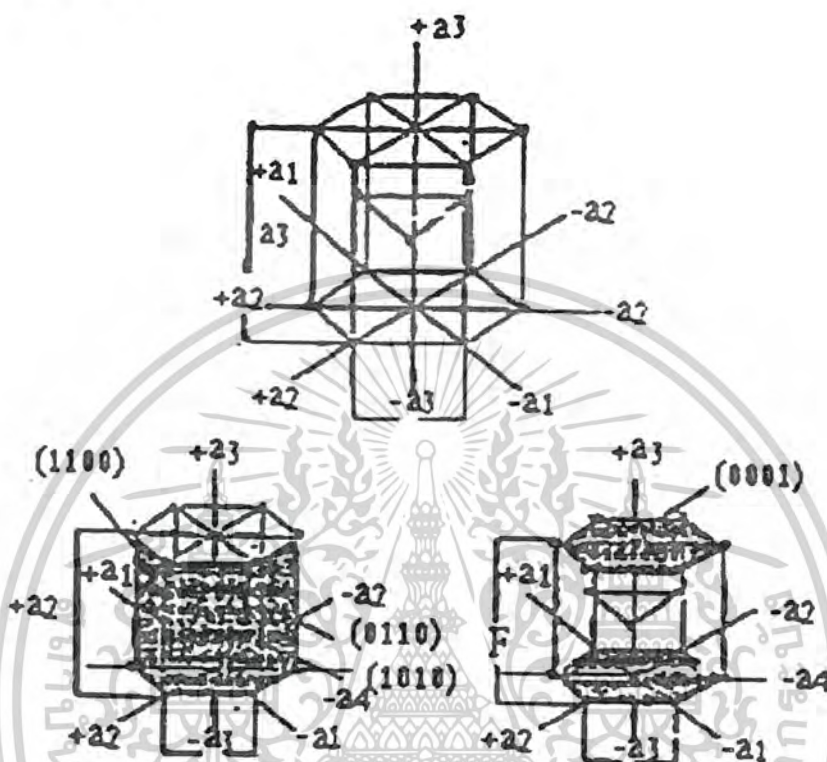


รูปที่ 2.5 แสดงคัชนีมิลเลอร์ของ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 คณิตศาสตร์ของระนาบภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค

[9-11]



รูปที่ 2.6 แสดงคณิตศาสตร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค

ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค คณิตศาสตร์ที่ใช้เรียกระนาบคือคณิตศาสตร์ของบราว ใช้สัญลักษณ์ h, k, l ซึ่งหาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 และ c ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับดังรูปที่ 2.6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์ระนาบฐานมี 2 ระนาบ คือ ระนาบฐานบน และ ระนาบฐานล่าง แกน a_1, a_2, a_3 จะเป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐานที่ทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน $a_1 = a_2 = a_3 = \alpha$ และแกนที่ 4 คือ แกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบทั้ง 2 ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนของระยะตัดแกนทั้ง 4 จะมีอัตราส่วนของจุดตัดแกนต่างๆ เป็น $(1/\infty \ 1/\infty \ 1/\infty \ 1/1)$ ดังนั้นคณิตศาสตร์บราว ก็คือ (0001) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แต่เมื่อพิจารณาถึงความสมมาตรของรูปทรงปริซึมของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีแกน $a_1 = a_2 \neq a_3$ จึงนิยมใช้คณิตศาสตร์เพียง 3 ค่า คือ (h, k, l) ที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับเพื่อใช้สำหรับบอกชื่อระนาบต่างๆ ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

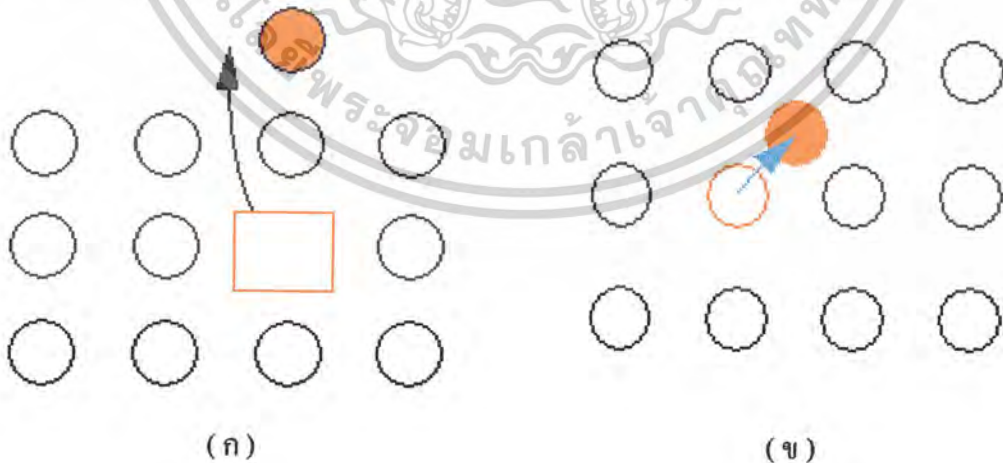
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง (real crystal) [9-11]

ผลึกจริงเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงผลึก (defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซัปสตีวชันนัล (substitution defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมใน โครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึก อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงข้อบกพร่องของผลึกแบบแวนแคนซีและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.1.3.1 ข้อบกพร่องของผลึกแบบแวนแคนซี [9-11]

ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุดซึ่งก็คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจาก โครงผลึกจะแบ่งเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือข้อบกพร่องผลึกแบบชอตคกี (schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอม หรือ ไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกหลุดหายไปอยู่ในบริเวณที่เป็นผิวหน้า (surface) ของโครงผลึก และข้อบกพร่องชนิดเฟรนเคิล (frenkel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างค้างแสดงในรูปที่ 2.7



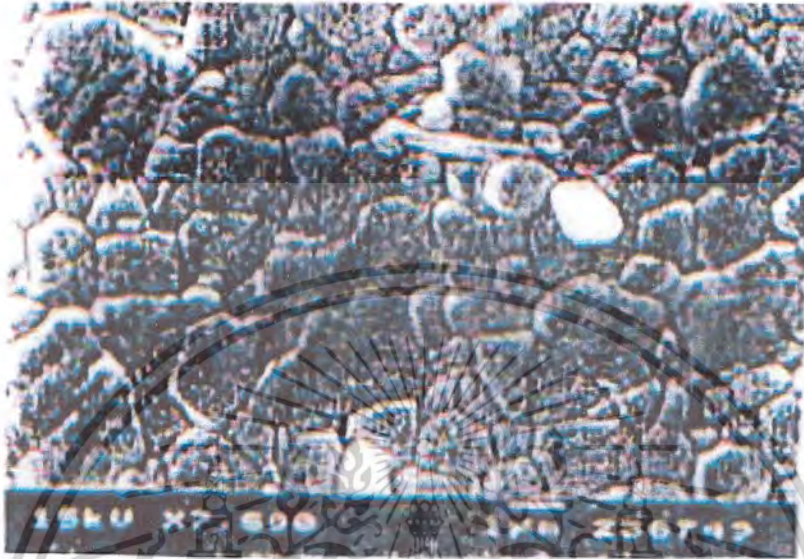
รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี

(ก) ชนิดชอตคกี

(ข) ชนิดเฟรนเคิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน [9-11]



รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน คือ บริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและแนวพรมแดนระหว่างเกรนต่างๆ ที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันเรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.8 ผลึกที่มีเกรนเดียว (single grain) จะเรียกว่าผลึกเดี่ยว หรือผลึกเอกพันธ์ (single crystalline) ผลึกที่มีหลายเกรนเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (poly crystalline) เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากกรณีผลึกในอุดมคติได้แก่ ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสกัดกั้นการไหลของกระแส หรือขอบเขตรอยต่อของเกรนก็ก่อตะอม โมเลกุลหรือไอออนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้น เป็นต้น

2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [9-11]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง $0.2-2 \text{ \AA}$ ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงสร้างผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq 2d$ หรือความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (inter-atomic spacing) คือ ให้ $\lambda \approx 10^{-8} \text{ cm}$ หรือ $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ ตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

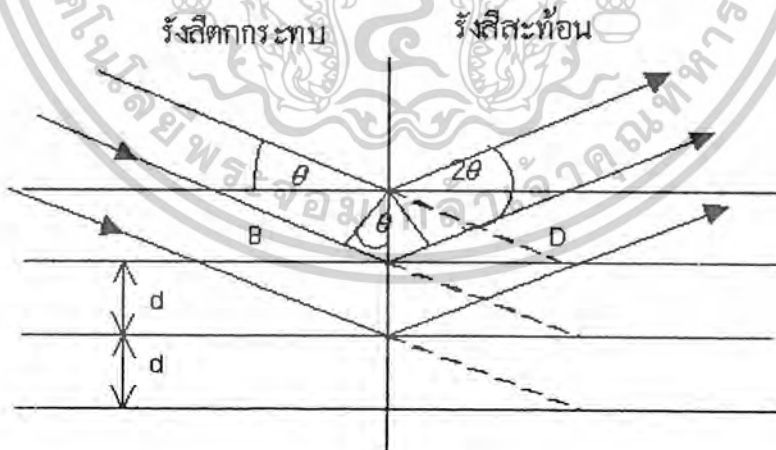
ผลึกที่ทำหน้าทีคล้ายเกรตติง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึกคังแสดง ในรูปที่ 2.9 ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า “ กฎของแบรกก์” ดังสมการ

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

โดย

$$\lambda(\text{Å}) = \frac{12.4}{\varepsilon(\text{keV})} \quad \text{และ} \quad \varepsilon = hV = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
 θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
 n คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3.....
 h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (plank constant)
 $h = 6.62 \times 10^{-27} \text{ erg sec} = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.sec}$



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใน โครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [9-11]

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบคิวบิก (cubic) โดยที่ $a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

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

เมื่อแทนสมการ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2.4)$$

โดยที่ $a =$ ค่าคงที่ของ โครงผลึก

2.1.5.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [9-11]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ จะถูกจัดอยู่ในระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่างๆ คือ $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ ดังนั้นจะได้ว่า

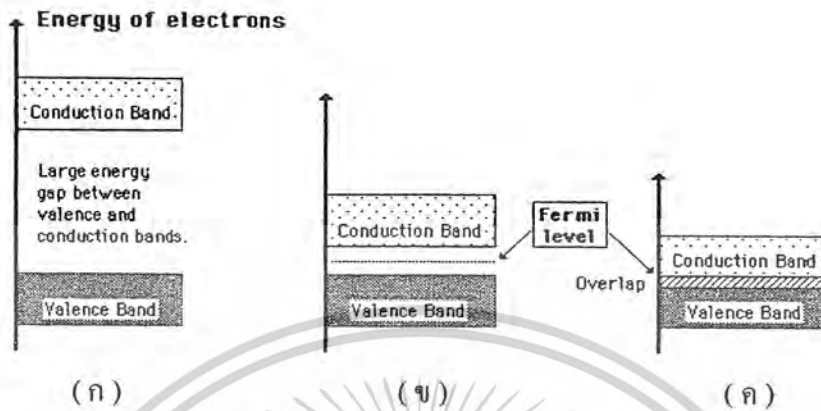
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4[h^2 + hk + k^2]}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [9,10,12,13]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของการเกิดสีของผลึก ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) ของสารกึ่งตัวนำและนำมาทำการคำนวณขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การเกิดสีของผลึก [9-10]



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ

- (ก) ฉนวน
- (ข) สารกึ่งตัวนำ
- (ค) ตัวนำ

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆเป็น ฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์คอยลอมบี้อัดเหนี่ยวเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อยและแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยและเรียกบริเวณนี้ว่า “บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap)” ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องว่างนั้นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g นำมาใช้แบ่งแยกสารชนิดต่างๆนั่นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3$ eV สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3$ eV และตัวนำมีแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั่นเอง

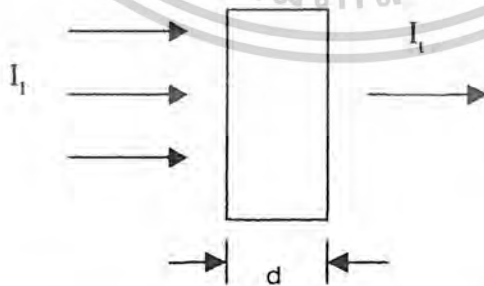
นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อให้พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจาก

จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน ออกจากผลึกทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่า $E_g = 2.42$ eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงิน หรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาทั้งหมดและเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านแสงสีน้ำเงินแต่พลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านแสงสีเหลืองเป็นต้นไปจะถูกส่งผ่านออกมาจากผลึก ด้วยเหตุนี้เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น ถ้าพิจารณาฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_0 แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_t ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient : α) ได้จากสมการที่ (2.6) และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอน ได้นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วยซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (2.6)$$

- เมื่อ I_0 = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง
 I_t = ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง
 α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 d = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธีทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าวมาข้างต้น คือ การสร้างสถานะพื้นฐานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง คือ

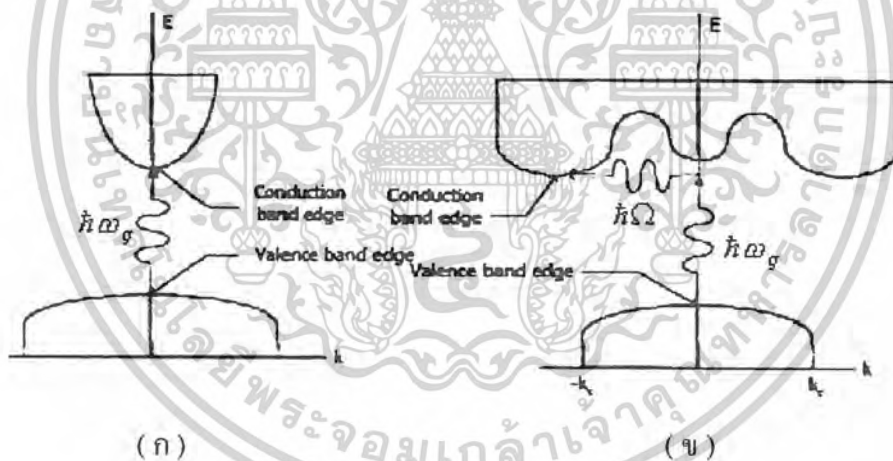
1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก Al_2O_3 เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้มหรือที่เราเรียกว่า ทับทิม (ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียงแค่ 0.5 % ไอออน Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงินหรือที่เราเรียกว่า แซฟไฟร์ ได้แก่ มรกต บุษราคัม นิล เป็นต้น
2. การระดมยิง (bombard) ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเลต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมากขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้นกล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราเห็นผลึกมีสีได้

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน [9,10,13]

โดยทั่วไปลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น (wave vector: k) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากันถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega_g = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟนอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) ส่วนลักษณะ โครงสร้างแบบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีการบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอนนั้นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K = k_c$ ออกมาจึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_c + \hbar \Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{ven}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 2.13 (ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งโครงผลึกจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเกิดการสั่นและสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืนโฟนอนแล้วก็จะตามด้วยกระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนซึ่งจะมีค่าเท่ากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระต่อไป

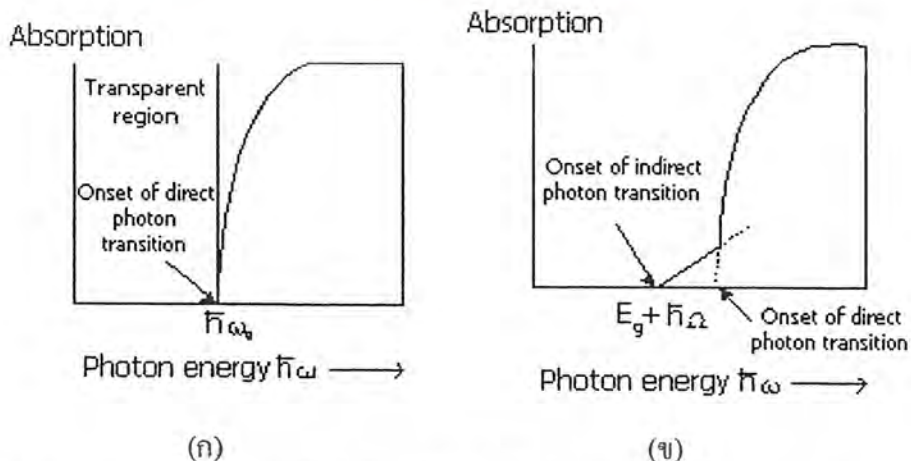


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0^{\circ} \text{K}$)

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



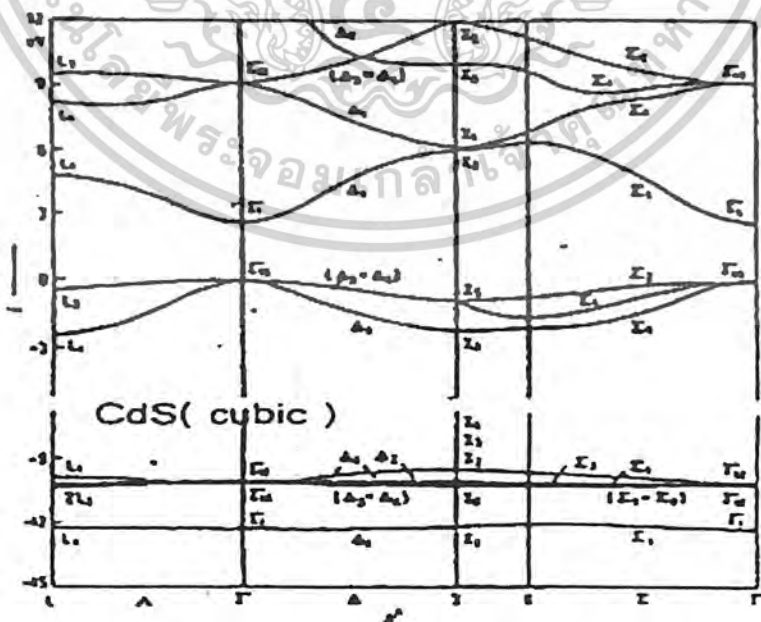
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอน ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0^{\circ} K$)

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

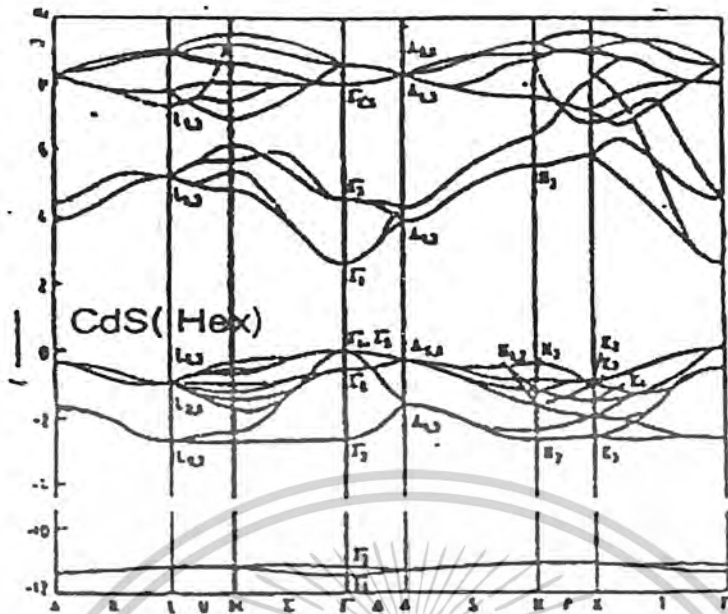
2.2.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [9,10,12,13]

CdS มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ มีการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน จากตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ในแนวเคอร์ค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และแบบเวิร์ทไซท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 และ 2.501 eV ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ

ซิงค์เบลนด์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin-orbit coupling) ในการคำนวณค่า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ โดยไม่เกิดการทับปัดระหว่างสปิน - ออร์บิต

2.2.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [12-13]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกเวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีสภาพของแม่เหล็ก (μ) = 1 จะได้สมการคลื่นเป็น

$$E = E_0 \exp [i (k \cdot r - \omega t)] \quad (2.7)$$

$$H = H_0 \exp [i (k \cdot r - \omega t)] \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0

H คือ สนามแม่เหล็กที่มีแอมพลิจูด H_0

$k = k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดยที่ k_1 คือ เวกเตอร์จริง k_2 คือ เวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k \cdot k = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

c คือ ค่าความเร็วแสง

ω คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่นและความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลง โดย

พิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = n - ik \quad (2.9)$$

โดยที่ $n =$ ดัชนีหักเห

$k =$ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

$$\begin{aligned} |k_1| &= n\omega / c \\ |k_2| &= n\omega / c \end{aligned} \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.7) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศ x เป็น

$$E_x = E_{0x} \exp[i\omega (n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (2.11)$$

E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดในทิศทาง x

จากสมการที่ (2.11) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$I \propto E^2 \quad (2.12)$$

ดังนั้นจะได้

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

หรือ

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

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.13)$$

โดยที่ $\alpha = 4\pi kx/\lambda$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ; (cm^{-1})

I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ; (W/cm^2)

I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบบ ; (W/cm^2)

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ ; (nm)

จากสมการที่ (2.13) เขียนได้ใหม่เป็น (2.14)

$$\alpha = \frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dx} \right) \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.14) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ CdS [9,10,12,13]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยการพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งเรียกว่าการเปลี่ยนสถานะแบบตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก. โดยสารกึ่งตัวนำ CdS มีการเปลี่ยนสถานะในกรณีนี้ และการเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้ยังแบ่งได้อีก 2 แบบ คือ การเปลี่ยนสถานะแบบยินยอม และการเปลี่ยนสถานะแบบต้องห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออปติคอลเมทริกซ์อิตีเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่กล่าวคือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลาและสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะทั้งแบบยินยอมและแบบต้องห้ามได้ดังนี้ คือ

การเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned}(\alpha h\nu) &= \frac{\partial \chi}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} |H_{\alpha}(0)|^2 (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &= A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad (2.15)$$

การเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$\begin{aligned}(\alpha h\nu) &= \frac{\partial \chi}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^{\frac{5}{2}} |H_{\alpha}(0)|_{k=0}^2 (h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \\ &= A'(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}}\end{aligned}\quad (2.16)$$

โดยที่ μ คือ มวลลดทอน (reduced electron-hole mass)

H_c คือ ออปติคอลเมทริกซ์อิตีเมนต์ (optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [9,10,12,13]

สำหรับในการทดลองของเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง (transmission : %T) ผ่านสารตัวอย่าง โดยที่พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ (I_0) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (I_t) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น (λ) ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 ค่าการสะท้อนและส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) / [1 + R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad (2.17)$$

$$R = I_r/I_0 = [(n-1)^2 + K^2] / [(n+1)^2 + K^2] \quad (2.18)$$

โดยที่	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อน
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	I_t	คือ	ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบาง
	I_0	คือ	ความเข้มของแสงตกกระทบฟิล์มบาง
	d	คือ	ความหนาของฟิล์มบาง
	n	คือ	ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง
	K	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนามากพอที่ $R^2 \exp(-2\alpha d)$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (2.17) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = I_t/I_0 = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2.19)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R^2)$ มีค่าคงที่และสมการที่ (2.19) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln(I_0/I_t) \quad (2.20)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (2.20) ยังมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (α_0) ที่เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง

ซึ่งเกิดจากการย้ายผลลบทางด้านของอเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้นเพื่อให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (2.6) และเราสามารถหาค่า E_g ได้จากสมการที่ (2.15) หรือ (2.16) หรือทำได้โดยการลากเส้นตรงโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน ($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั่นเอง และลักษณะของกราฟจะแสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข)

2.3 สมบัติทางไฟฟ้า [9,10,14]

จากทฤษฎีแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [9,10,14]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

จาก $\mu = v_d/E$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \quad (2.21)$$

เมื่อ μ_n และ μ_p คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) กับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity : ρ) มีค่าเป็น $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามักเป็นไปตามสมการ

$$\rho = 1/q(\mu_n + \mu_p) \quad (2.22)$$

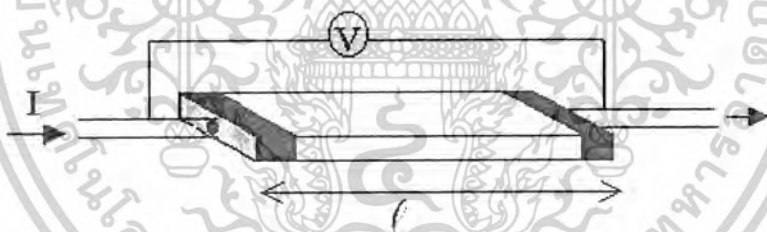
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [14,15]

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนตัวของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.3.2.1 วิธีวัดโดยตรง (direct method) [14,15]

โดยทั่วไปแล้วการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรง หมายถึง การวัดค่าความต้านทานรวมของสาร แล้วถึงมาคิดความยาวและพื้นที่หน้าตัดของสารที่ต้องการวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น ทรงกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในขณะที่เดียวกันวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมกันซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยวิธีวัดโดยตรง

จากค่าที่ทราบ คือกระแสและศักย์ไฟฟ้านี้นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าที่วัด

$$R = \rho l / A \quad (2.23)$$

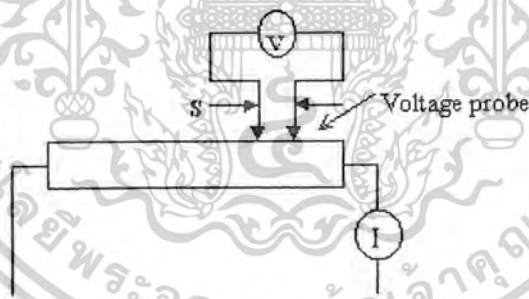
$$\rho = R(A / l) = (V / I)(A / l) \quad (2.24)$$

จะเห็นว่าวิธีเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงอีกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าหลายองค์ประกอบด้วยกัน
ไมวารณี่ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่าบริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นเป็นกระแสไอห้่มมิกที่ตีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มีคุณสมบัติไอห้่มมิกที่ตีแสดงว่าจะต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้า(หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงๆของสารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองใกล้เคียงกันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริง ซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสไอห้่มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เพราะที่ผิวสัมผัสจะตีหรือไม่ตีนั้นจะตรวจสอบได้ยากกว่า จึงแก้ไขได้ด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงๆ ถ้าทำเช่นนี้ค่าความผิดพลาดก็จะน้อยมาก

2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe method) [14,15]



รูปที่ 2.17 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของสารแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับวิธีวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุด เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสารตัวอย่าง เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้ จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าอยู่ในแนวเส้นสมศักย์ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้า - ออกจะต้องมีค่ามากกว่า 3 เท่า ($I / A > 3$ เมื่อ I คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส) ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการคือ โครงสร้างผลึก ว่ามีโครงสร้างชนิดใด

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

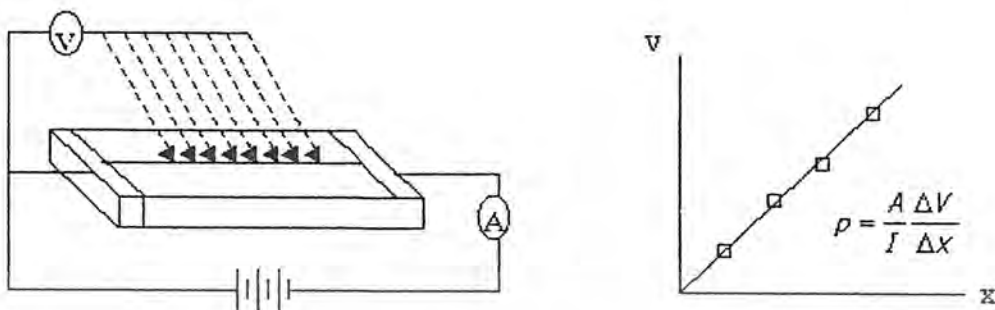
สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้น

- วัดศักย์ที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า - ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์บนสารกึ่งตัวนำนั้นจะต้องเป็น โลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น พลาตินัม ทังสเตน เงิน เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่างจะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่างที่กำลังวัดอยู่บนระนาบใดหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องเป็นผลึกสมบูรณ์มีเกรนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรนที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลายๆ จุดและจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้นๆเพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์สม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะแก้ไขด้วยวิธีครั้งที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

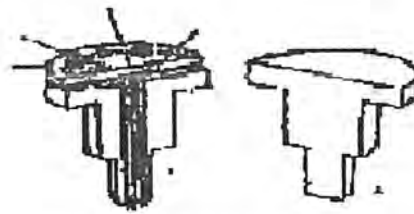
รูปที่ 2.18 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแบบวิธีสองขั้วเชิงเส้น

(ก) แสดงการวัดแบบสองขั้วเชิงเส้น โดยวิธีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

(ข) แสดงกราฟที่ได้จากการวัด โดยวิธีการเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe method) [14-15]

วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้นเป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม วิธีนี้ได้ใช้กันมานานประมาณ 70 กว่าปีมาแล้วซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้กันอยู่ เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วมีปัญหา 2 จุดและ 4 จุด คล้ายๆกัน คือ ปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่างๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้าออก ตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนเลสมีลักษณะเส้นเล็กและแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกัน จัดให้ห่างเท่ากันหมดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน ลักษณะของหัววัดสี่ขั้วเชิงเส้นดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นตัวอย่างอันหนึ่งของรูปหัววัดซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

(ก) โครงสร้างภายในของหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

(ข) ส่วนประกอบหัววัดค่าความต้านทานแผ่นแบบวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นที่สมบูรณ์

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะพอจะมีแนวความคิดได้ดังนี้เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริงๆแล้วจะใช้การหาค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการของปัวซอง (Poisson's equation) ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาของสูตรคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความต้านทานจำเพาะโดยทั่วไปแล้ว จะหาได้จากกระแสลัดเข้าไปในสารตัวอย่างและวัดศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัดในการคิดกระแสจะต้องให้ลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะ ด้วยวิธีหลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้น สูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสม ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ กล่าวคือ

1) ขั้วทั้งสองจะต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็น โลหะมีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย

2) สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้งสองวางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (hemisphere) โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิตย์เมื่อมีการคิดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่างจะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างที่ระยะใดๆได้

$$V = K / r \quad (2.25)$$

เมื่อ r ก็ระยะใดๆที่จะหาศักย์ที่จุดที่ให้กระแส และ K คือค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้ม

ของกระแสที่ลัดเข้าไปและรูปร่างของลวดตัวอย่าง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ข้อผิดพลาดที่ควรระวังในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าชนิดสองขั้ว หรือสี่ขั้วเชิงเส้น [14,15]

ถึงแม้ว่าการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง เป็นวิธีที่มาตรฐานมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แต่มีข้อควรคำนึงถึงก่อนที่จะทำการวัดสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ซึ่งพอจะสรุปเป็นข้อย่อๆ ได้ดังนี้

1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้ จะรวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่างเข้าได้ด้วย ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่วางหัววัดได้ และรูปทรงของสารตัวอย่างจะมีความสม่ำเสมอหรือมีรูปร่างทางเรขาคณิต เพราะความยาวและพื้นที่หน้าตัดมักจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเสมอ

2. การรั่วไหลของกระแส

การรั่วไหลอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบ และ บริเวณฐาน อันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง จึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจจะเกิดจากความผิดปกติทางผลึกภายในอีกด้วย

3. อุณหภูมิ

- สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น โลหะมีผลกระทบน้อยกว่าฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมีผลควรทำการวัดหลายๆ จุดและจะต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้นๆ เพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์สม่ำเสมอ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะใช้วิธีวัดที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ค่าความชันที่หาได้จะเป็นความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

4. แสง

ขณะทำการวัดควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบบนสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงานสามารถกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเกิดขึ้นได้ ส่งผลทำให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกัน แรงดันไฟฟ้าที่ตกใน

สารตัวอย่าง ทำให้วัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าผิดพลาดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า

ปรากฏการณ์นี้จะหลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วยกระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อย สำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะแต่ละจะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นจึงพยายามวัดในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

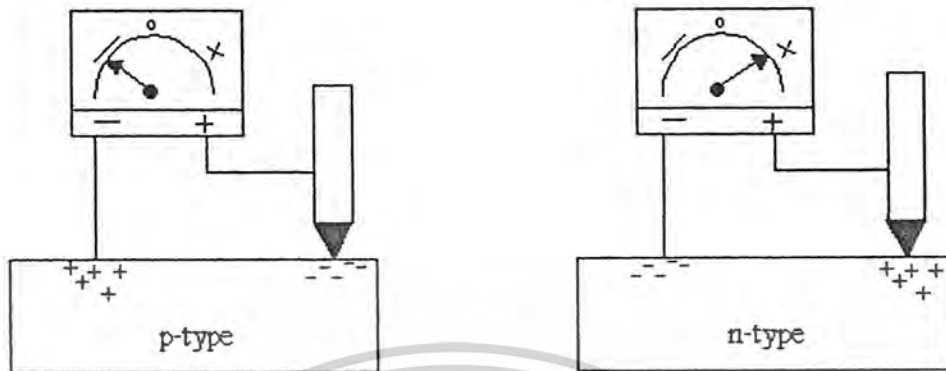
6. ผิดสัมพันธ์ระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างชนิดที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ มักจะมีแรงดันคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสทำให้เกิดข้อผิดพลาดการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบและเลือกชนิดของโลหะที่ใช้มาเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อนค่าที่ได้จะเป็นที่ยอมรับ การทดสอบความต้านทานขั้วสัมผัสมักจะพิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้บางอย่างอาจหลีกเลี่ยงได้ บางอย่างก็อาจหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของสารตัวอย่างจากหลักโดยทั่วไปแล้วควรจะต้องวัดหลายๆครั้งที่เงื่อนไขเดียวกันและวัดหลายๆวิธี เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนและเชื่อถือได้ และในการแสดงค่าความต้านทานของสารตัวอย่างมักจะบอกคู่ไปกับค่าที่วัดได้ว่าวัดด้วยวิธี

2.4 เทคนิคการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยการใช้วิธีขั้วความร้อน (hot probe) [9-10]

วิธีขั้วความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดอื่นหรือชนิดพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือจี้หัวแร้งบัดกรีลงโดยตรงบริเวณที่ปรากฏเป็นรอยค่างของผิวหน้าฟิล์มบาง รอยค่างนี้เกิดจากบริเวณที่กระเจกเสียบเข้ากับแท่งเทฟลอน ดังนั้นฟิล์มจึงเคลือบไม่ติด โยงสายไฟจากหัวแร้งเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกฟิล์มบางนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็มโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังแสดงในรูปที่ 2.20



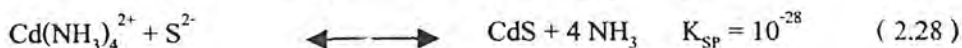
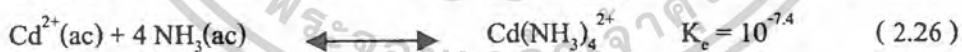
รูปที่ 2.20 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน

2.5 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี [15-19]

ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี สารตั้งต้นประกอบไปด้วยแคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของซัลเฟอร์ไอออน (S^{2-}) และแอมโมเนีย (NH_3) โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหมาะสม ได้ค่า pH ประมาณ 10-12 และอุณหภูมิประมาณ 80-90 °C

2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [15-19]

ฟิล์มบาง CdS เกิดจากเกลือแคดเมียมในสารละลาย NH_3 โดยเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



จากสมการที่ (2.26) เกลือ CdSO_4 แยกตัวให้ Cd^{2+} จากนั้น Cd^{2+} จะรวมตัวกับแอมโมเนีย NH_3 กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนที่เรียกว่าแคดเมียมเตตระแอมมีน (Cadmium Tetraammine Complex ion ; $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{2+}$) จากนั้นแยกตัวให้ Cd^{2+} แล้วรวมตัวกับ S^{2-} ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของไทโอยูเรีย ถ้าผลคูณความหนาแน่นของ Cd^{2+} กับ S^{2-} เกินกว่าค่าผลของควม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถในการละลาย (solubility product ; K_{sp}) ของ CdS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.1×10^{-28} ก็ปรากฏคอลลอยด์ (colloid) ของ CdS ขึ้นในสารละลาย

โดยปกติ NH_3 จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของ Cd^{2+} ดังนั้นจึงนิยมใช้ NH_3 ที่มีความเข้มข้นมากเพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของ Cd^{2+} และ S^{2-} มีค่าเกินผลของความสามารถของการละลายของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2×10^{-14} เพราะจะทำให้เกิดเป็นคอลลอยด์ของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ แทนที่จะเป็น CdS ดังสมการที่ (2.29)



การเกิดฟิล์มบาง CdS ประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ

1. การจับ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ที่ผิวแผ่นรองรับ



ซึ่งปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้ความเข้มข้นของ NH_3 ประมาณ 0.8-2.5 โมลาร์

2. การจับไทโอยูเรียเอาไว้โดยทำให้เกิดองค์ประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร

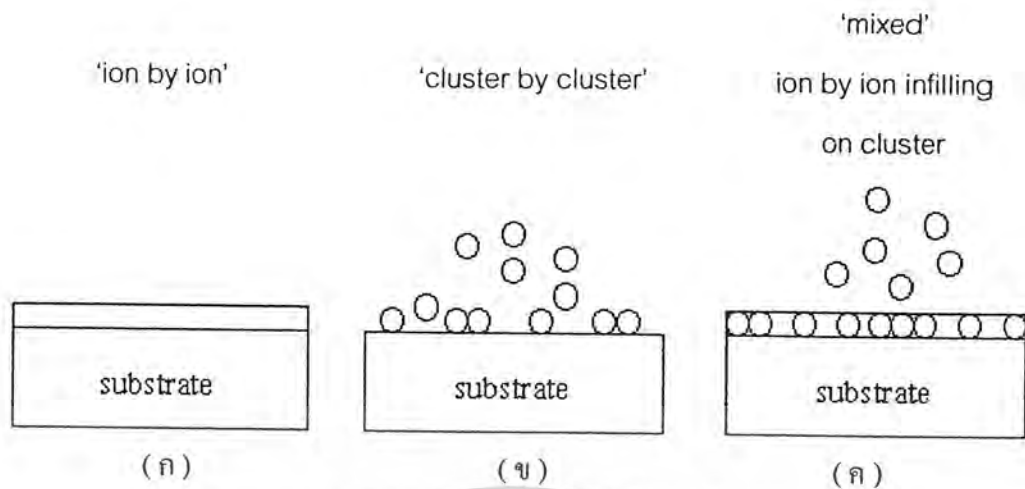


3. การเกิด CdS และการเกิดที่อยู่ใหม่โดยการแตกตัวขององค์ประกอบเชิงซ้อน



การเกิดฟิล์มบาง CdS ในสมการที่ (2.26) ถึง (2.28) เรียกว่า การตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogenous precipitation) หรือการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกลุ่มก้อน (cluster by cluster) คือ กลไกการตกผลึกที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารของสารละลาย โดยจะจับกันเป็นกลุ่มก้อนก่อนที่จะมาเคลือบติดอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) ส่วนสมการที่ (2.30) ถึง (2.32) เรียกว่าแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogenous precipitation) หรือตกผลึกแบบไอออนต่อไอออน (ion by ion) คือ กลไกการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ กล่าวคือ Cd^{2+} จะดูดซับไว้บนผิวหน้าของแผ่นรองรับ จากนั้น Cd^{2+} จะรวมตัวกับ OH^- กลายเป็น $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ต่อมาจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง $\text{Cd}(\text{OH})_2$ กับ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ทีละไอออนจนกระทั่งกลายเป็นกลุ่มก้อน CdS ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข)

โดยทั่วไปแล้วในการเกิดฟิล์มบางเคลือบที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับนั้น จะเกิดขึ้นจากทั้ง 2 กลไกที่กล่าวมาข้างต้นได้เกิดการผสมกันและกลไกต่างๆ นั้นเกิดขึ้นได้อย่างอิสระ โดยเรียกว่าเป็นกลไกแบบผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค)



รูปที่ 2.21 แสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ

- (ก) การตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส
 (ข) การตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส
 (ค) การตกผลึกแบบผสม

2.5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ [15-19]

เนื่องจากความสามารถในการละลายของ CdS มีค่าต่ำ ดังนั้นการควบคุมการตกผลึกสามารถทำได้โดยการควบคุม Cd^{2+} ต้องเลือกตัวแทนเชิงซ้อน (complexing agent) ซึ่งในที่นี้จะใช้ NH_3 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของ Cd^{2+} โดยให้ NH_3 รวมตัวกับ Cd^{2+} กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนดังสมการที่ (2.26) ถึง (2.33) ซึ่งไอออนเชิงซ้อนจะแตกตัวให้ไอออนอิสระดังสมการ



เมื่อพิจารณาค่าของ K_{sp} และค่าคงที่สมดุล K_c จะเห็นว่า CdS สามารถตกผลึกได้ง่ายโดยทั่วไปการเกิดฟิล์มบาง CdS มักเกิดการผลึกแบบโฮโมจีเนียสและแบบเฮเทอโรจีเนียส ซึ่งการเกิดแบบโฮโมจีเนียสมักจะเกิดมากในช่วงท้ายของการเกิดฟิล์มบาง มีผลทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพลดลง กล่าวคือ โปร่งแสงน้อยลง และมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวด้านนอกหยาบร่อนได้ง่าย

2.6 ข้อมูลที่สืบค้นจากผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว[18-25]

Saiah และ Chow [18] เสนอวิธีการสร้างฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี (CBD) โดยพยายามลดบทบาทของกระบวนการโฮโมจีเนียส โดยการกำหนดตัวแปรที่ทำให้ความหนาของฟิล์มที่เคลือบเพียงครั้งเดียวมีค่ามากที่สุด การเคลือบครั้งต่อมาจะทำการเคลือบโดยเพิ่มความเข้มข้นของสารในขณะที่ฐานรองที่ใช้เคลือบยังอยู่ในอ่างที่ใช้เคลือบ จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง เขาสรุปว่าที่อุณหภูมิ $85^\circ C$ ความเข้มข้นของ $[Cd(CH_3COO)_2]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$[\text{SC}(\text{NH}_2)_2] = 0.5$, $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2]/[\text{NH}_3] = 0.0033$ และ $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2]/[\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}]$ อยู่ใน ช่วง 0-12 จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากระบวนการโฮโมจีเนียสที่น้อยที่สุด เหมาะที่จะนำมาทำฟิล์มบาง CdS และทำให้ความหนาในการเคลือบครั้งแรกมาก

Guille และคณะ [19] ได้ศึกษาความเข้มข้นของเกลือแคดเมียม, ความเข้มข้นของไทโอยูเรีย และเวลาที่ใช้ในการเคลือบของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธี CBD ว่าความเข้มข้นของเกลือ แคดเมียมและความเข้มข้นของไทโอยูเรียมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงอย่างไร พบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของเกลือแคดเมียมและความเข้มข้นของไทโอยูเรียทำให้การส่งผ่านทางแสงและการนำไฟฟ้ามักขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเคลือบ นอกจากนี้เมื่อทำการ แอนนัลที่อุณหภูมิ 200-400 °C เป็นเวลา 20 นาที พบว่าขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปความยาวคลื่น น้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนัล

Sebastian และ Ocampo [20] ได้เสนอการสร้างฟิล์มบาง CdS ที่มี การนำไฟฟ้าชนิดพี (p-type) ที่เจือด้วยอะตอม Cu โดยวิธีการเตรียมฟิล์มวิธีออบสารละลายเคมี กระบวนการที่เกิดขึ้นคือ อะตอม Cu จะประพุดิตัวอะตอมผู้รับ (acceptor) ซึ่งจะให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) ขึ้นมาในโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS จะทำได้โดยการใส่ CuCl ในปริมาณที่ต่ำ (0.005 M) ในอ่างสารละลายเคมี ที่ระดับการเจือที่ต่ำของ Cu ในฟิล์มบาง CdS ฟิล์มจะเข้าใกล้ความเป็น สดขอมิโอมเมตร และลักษณะต่อการตอบสนองต่อแสงเร็วมากที่ระดับการเจือที่สูงของ Cu ใน ฟิล์มบาง CdS ฟิล์มจะแสดงความเป็นอะมอร์ฟัส และค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเปลี่ยนแปลงจาก 2.35 – 2.00 eV การเจือด้วย Cu จะมีผลต่อการตอบสนองต่อแสง,สมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทาง ไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์ม

Petre และคณะ [21] ศึกษา ฟิล์มบาง CdS ที่ถูกเจือด้วย Cu โดยการเพิ่มเกลือ CuCl_2 ในอ่าง สารละลายเคมีของ CdS ฟิล์มที่ถูกเจือแล้วจะนำมาแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้าง,สมบัติทางแสง,ทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ก่อนและหลังการเจือ พบว่า CdS ก่อนการเจือจะมีความสมบูรณ์และแสดงการตอบสนองต่อแสงเพิ่มขึ้น 10^4 - 10^6 การนำฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบทางเคมีที่นำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์-แสง, สภาพต้านทานไฟฟ้าขณะ ไม่มีการฉายแสงมีค่าสูงถึง 10^5 - $10^7 \Omega\cdot\text{cm}$ เมื่อฉายแสงแล้วความต้านทานลดต่ำจนถึงเกือบ 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ และ CdS ที่ถูกเคลือบมีสีเหลืองขี้เถ้ากับฐานรองได้ดี หลังจากนำมาแอนนัลด้วยความร้อน

สีของฟิล์มจะมีสีส้ม โครงสร้างผลึกเป็นเฮกซะโกนอล พบโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่ม CuCl_2 ในอ่างสารละลายเคมีจะได้ฟิล์มที่มีผิวหน้าเรียบสะท้อนแสงได้ดีหลังจากการแอนนิตในอากาศสีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเหลืองและเกรนมีขนาดเล็กลง การเพิ่มความเข้มข้นของไอออน Cu^{2+} จะทำให้จุดก่อเกิดมีปริมาณมากส่งผลให้ขนาดของเกรนเล็กลง และการส่งผ่านทางแสงขึ้นกับความเข้มข้นของ Cu ก่อให้เกิดระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานและคูคกลืนแสงที่ความยาวคลื่นค่าสูงๆ การเจือ Cu จะทำให้ช่องว่างแถบพลังงานลดลง เมื่อปริมาณการเจือ Cu เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สภาพต้านทานขณะไม่ฉายแสงและการตอบสนองทางแสง ของฟิล์ม CdS เพิ่มขึ้น ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มที่ไม่ได้เจือ CdS มีค่าเท่ากับ 2.48 eV หลังจากการเจือช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าลดลงเหลือเพียง 2.3 eV ,ค่าช่วงชีวิตของพาหะอิสระลดลงจาก $8 \text{ ms} - 1.3 \text{ ms}$ และความเข้มของพาหะที่ถูกจับจะมีผลกระทบต่ค่าช่วงชีวิตของพาหะอิสระ,การกระจายสเปกตรัมของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงและการตอบสนองเชิงแสง

Rizakhanov และคณะ [22] เสนอว่าแถบแสงสีส้มที่เปล่งออกมาจากผลึก CdS ที่เจือด้วย Ag ที่อุณหภูมิ $77 \text{ }^\circ\text{K}$ จุดสูงสุดของแถบเปล่งแสงอยู่ในช่วง $h\nu=2.02-2.14 \text{ eV}$ แถบเปล่งแสงนี้เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลระหว่างระดับพลังงานผู้ให้กับผู้รับ ระดับพลังงานผู้ให้อยู่ต่ำกว่าแถบนำ 0.23 eV และระดับพลังงานของผู้รับอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ 0.26 eV เมื่อปริมาณสารเจือและอุณหภูมิแอนนิตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มของการเปล่งแสงลดลงจนหมด โดย Ag แทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง โครงผลึกจะประพศิตัวเป็นอะตอมผู้ให้ แต่สำหรับ Ag ที่เข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้รับที่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ รัศมีของอิเล็กตรอนระดับพลังงานผู้ให้มีความประมาณ 16 \AA ($r_0 \sim 16 \text{ \AA}$) พื้นที่หน้าตัดของการจับอิเล็กตรอน (electron-capture cross section) มีค่าประมาณ $10-30 \text{ cm}^2$ ($S_1 \sim 10-30 \text{ cm}^2$)

Ristova และ Ristov [23] ฟิล์มบาง CdS:Ag ที่เคลือบโดยวิธีอบสารละลายเคมี บนฟิล์ม SnO_2 ที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง จะได้ชั้นหน้าต่าง (window) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย Ag สารเจือนี้มาจากสารละลาย AgNO_3 ความเข้มข้น 0.025 M ใช้เวลาจุ่ม ประมาณ 20 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นมีการเคลือบฟิล์มบาง SnS_x ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จึงกลายเป็นรอยต่อ p-n สารกึ่งตัวนำ SnS_x สามารถเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ขึ้นกับองค์ประกอบ x ใช้ กาวกราไฟท์ (graphite paste) ในการทำรอยต่อโอห์มมิกของเซลล์แสงอาทิตย์ $\text{SnO}_2/\text{CdS:Ag}/\text{SnS}_x$ กับ $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{SnS}_x$ และเปรียบเทียบผล สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบาง CdS:Ag สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงลดลง สำหรับ R_s และ R_{sh} ของ cell ทั้งสองที่ความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆกัน สังเกตเห็นว่า ความต้านทานอนุกรม (R_s) จะลดลงเมื่อเจือด้วย Ag แต่ความต้านทานขนาน (R_{sh}) ของเซลล์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ฟิล์มบางที่เจือด้วย Ag มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์สูงกว่า

Bobyl และ Shinkman [24] การศึกษาการเจือ Ni ซึ่ง Ni มีประจุได้หลายค่า คือ Ni_p^{1+} มีการจัดอิเล็กตรอนในวงโคจร d เป็น $3d^7$ ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้รับ Ni_p^0 มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในวงโคจร d เป็น $3d^8$ เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral) ซึ่งสามารถจับอิเล็กตรอนจากแถบนำ ทำหน้าที่เป็นกับดัก, Ni_p^{1-} มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในวงโคจร d เป็น $3d^9$ ทำหน้าที่เป็นผู้รับอิเล็กตรอน สำหรับกรณีของผลึก CdS และ ZnSe สารเจือ Ni จะไปแทนที่ตำแหน่งของ Cd และ Zn จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์โดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากแถบนำมายังแถบวาเลนซ์โดยไม่มีการเปล่งแสง (nonradiative) เนื่องจากผ่านระดับพลังงานของกับดักในช่องว่างแถบพลังงาน

Bol และ Meijerink [25] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ของการเปล่งแสงของผลึกระดับนาโนเมตร $ZnS:Mn^{2+}$ การเพิ่มความเข้มข้นของ Mn^{2+} ทำให้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของผลึกระดับนาโนเมตร $ZnS:Mn^{2+}$ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งประสิทธิภาพเชิงควอนตัมไปยังค่าเสถียร ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมลดลงไม่มากสังเกตจากความเข้มข้นของ Mn^{2+} ที่ยังคงมีค่าสูง มีการรายงานในเอกสารระดับนาโนเมตร $ZnS:Mn^{2+}$ ทำให้การเปลี่ยนแปลงชนิดโพลีเมอร์จาก MA เป็น PVB หรือ PVB ทำให้ขนาดของเกรนเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมเปลี่ยนแปลงไปด้วย มันเป็นเรื่องยากที่จะศึกษาพฤติกรรมของหลายๆโพลีเมอร์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงควอนตัม และประสิทธิภาพควอนตัมสามารถทำให้เพิ่มขึ้นโดยการฉายแสง UV ซึ่งอาจอธิบายได้ด้วยกลไก 2 ชนิด คือ แสงอัลตราไวโอเลตจะทำการอบโพลีเมอร์ให้แห้ง (UV curing) และกลไกการเกิดออกซิเดชัน (photo-oxidation) ที่บริเวณผิวหน้าของเกรนในระดับนาโนเมตร ขณะมีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี พร้อมทั้งทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุทรานซิชันบางชนิดเช่น Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ทั้งก่อนและหลังเจือ รวมทั้งศึกษาอุณหภูมิการแอนนัลว่ามีผลอย่างไรกับฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยธาตุทรานซิชันดังกล่าว การศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบางนั้นจะศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และศึกษาการส่งผ่านทางแสง เพื่อศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของฟิล์มบางและนำไปคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานตลอดทำการตรวจสอบชนิดของการนำไฟฟ้าและนอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

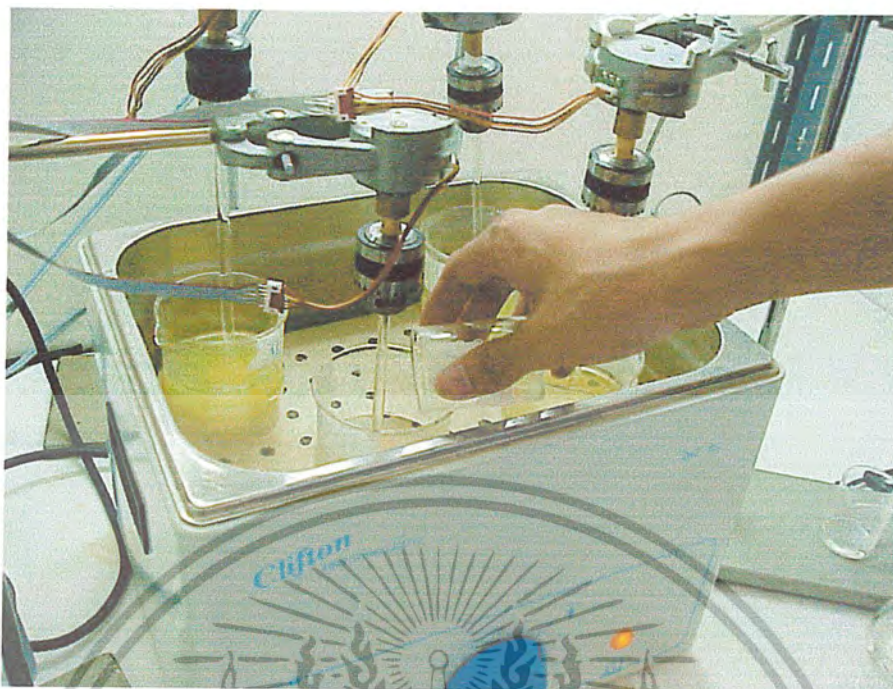
3.1 วิธีการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

อุปกรณ์หลัก คือ แท่นยึดแผ่นรองรับทำจากเทฟลอน (teflon) ซึ่งเจาะรูวงไว้ประมาณ 8 รูและเจาะรูตรงกลางสำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้ง และใส่แท่งแก้วตันเพื่อใช้เป็นแกนยึด โดยแท่งแก้วถูกยึดอยู่กับมอเตอร์ที่ยึดไว้กับขาตั้งและจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอลดประจุอยู่ 100 ml โดยที่บีกเกอร์ตั้งอยู่ในอ่างน้ำ (bath) ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิและควบคุม การเตรียมฟิล์มบางจะทำการปรับอุณหภูมิของอ่างน้ำไว้ได้คงที่ประมาณ 80°C ดังรูปที่ 3.1 และปรับความเร็วในการกวนสารละลายประมาณ 60 รอบ/นาที นอกจากนี้ยังใช้เครื่องอัลตราโซนิค มาช่วยในการกำจัดคอลลอยด์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งติดอยู่บนฟิล์มบางที่เตรียมได้บนแผ่นรองรับ โดยที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์แสดงดังตารางที่ 3.1 สารตั้งต้นต่างๆจะถูกเทลงในบีกเกอร์ที่เติมน้ำปอลดประจุนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมดเป็น 150 ml โดยที่ให้

- ความเข้มข้นของ $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$ = 0.01 M
- ความเข้มข้นของ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ = 0.05 M
- ความเข้มข้นของ NH_3 (25%) = 1.5 M
- ความเข้มข้นของสารเจือของธาตุ Cu, Cr, Co, Ni, Fe เป็น 1% ของความเข้มข้นของ $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$ นั่นคือ 0.0001 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 ml

สารตั้งต้น	ปริมาณ (g)
$\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$	0.3845
$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$	0.5706
NH_3 (25%)	16.83 ml
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.0025
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0.0044
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0035
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.0041
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเตรียมแผ่นสไลด์ [9]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 12 และ 25 mm ซึ่งทำความสะอาดเป็นอย่างดี ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำล้างจานและล้างด้วยน้ำปอดคประจุ
- 2) จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene, TCE) เพื่อขจัดคราบไขมัน, อะซีโตน (acetone) เพื่อขจัด TCE , เอทานอล (ethanol) เพื่อขจัดอะซีโตน และน้ำปอดคประจุตามลำดับ
- 3) นำกระจกสไลด์จากข้อ 2 ไปแช่ในสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กับน้ำปอดคประจุปริมาตร 10 ml และ 100 ml ตามลำดับ เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดคประจุอีกครั้ง
- 4) จากนั้นนำกระจกสไลด์ไปใส่ในน้ำปอดคประจุ และทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค 3 รอบ รอบละ 10 นาที
- 5) นำกระจกสไลด์ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ก็จะได้กระจกสไลด์ที่สะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

3.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมีประกอบไปด้วย โดยสารละลาย $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.01M ละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ จำนวน 0.05 M ละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml และ NH_3 (25%) จำนวน 16.83 ml บรรจุในบีกเกอร์ขนาด 50 ml ในการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni จะใช้ปริมาณสารตั้งต้นเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมมีดังต่อไปนี้

- 1) เสียบกระจกสไลด์เข้ากับแท่นยึดที่ทำจากเทฟลอน แล้วนำไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีแท่งแม่เหล็ก และน้ำปอดคประจุอยู่ 100 ml ซึ่งบีกเกอร์ตั้งอยู่ในอ่างน้ำบนเครื่องกวนสารละลายที่ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 80°C และปรับความเร็วในการสารละลายเท่ากับ 60 รอบ/นาที
- 2) ชั่งสารตั้งต้นที่ประกอบไปด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต ($\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$), ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) และ แอมโมเนีย NH_3 (25%) ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
- 3) เมื่ออ่างน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 80°C จึงละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟต, ไทโอยูเรียและ

แอมโมเนียเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้องจากนั้นเติมน้ำปอดคประจุจนมีปริมาตรเป็น 150 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เติสารละลายจากข้อ 3 ลงในบีกเกอร์ โดยเทสารละลายแคะเมียมซัลเฟตก่อน แล้วตามด้วยแอมโมเนีย และไทโอยูเรีย ตามลำดับแล้วทำการวัดค่า pH ของสารละลาย ซึ่งมีค่าประมาณ 11.8 และสังเกตสีที่เปลี่ยนไปของสารละลาย ปล่อยให้ทิ้งไว้ 60 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่
- 5) หลังจากผ่านไป 60 นาที จึงนำแท่นอิเล็กโทรดสไลด์ออกจากสารละลาย ซึ่งจะเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนกระดกสไลด์ และปรากฏอนุภาคของ CdS ที่จับกันเป็นก้อนเล็กๆเป็นคอลลอยด์อยู่ที่ผิวหน้าฟิล์มบาง
- 6) นำแท่นอิเล็กโทรดสไลด์ไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปดลคประจุอยู่ประมาณ 200 ml ซึ่งตั้งอยู่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อทำการเขย่าให้คอลลอยด์ที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าออก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการเปลี่ยนน้ำปดลคประจุและเขย่าซ้ำจนผงฝุ่นที่เกาะอยู่หลุดออกจนหมด
- 7) นำฟิล์มบางที่ได้มาทำการเคลือบซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 จนครบ 3 ครั้ง จากนั้นนำไปแห้งด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์ และเก็บในถุงที่ปิดผนึกอย่างดี เพื่อนำไปใช้งานขั้นต่อไป
- 8) ในการทดลองการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุทรานซิชันต่างๆ ทำได้เช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือจะแตกต่างกันตรงที่จะทำการเจือธาตุทรานซิชัน Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ตามที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 กล่าวคือนำธาตุทรานซิชันมาผสมกับไทโอยูเรียที่เตรียมไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งละลายในน้ำ 10 ml ที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 50 ml ก่อนที่จะทำการเทสาร จากนั้นทำตามข้อที่ 1-7 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยที่ต้องควบคุม pH ของสารละลายให้มีค่าคงที่ประมาณ 11.6-11.8
- 9) นำฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือธาตุทรานซิชันต่างๆ ที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที
- 10) นำฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือธาตุทรานซิชันที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆมาทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องซีห้อฟิลลิปปี รุ่น PW 1830 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน $\text{CuK}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 25 mA และแรงดัน 30 kV
- 11) นำฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือธาตุทรานซิชันต่างๆ ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ มาทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ด้วยเครื่อง ยูวี - วิซิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ซีห้อจัสโก้, รุ่น 7800 เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

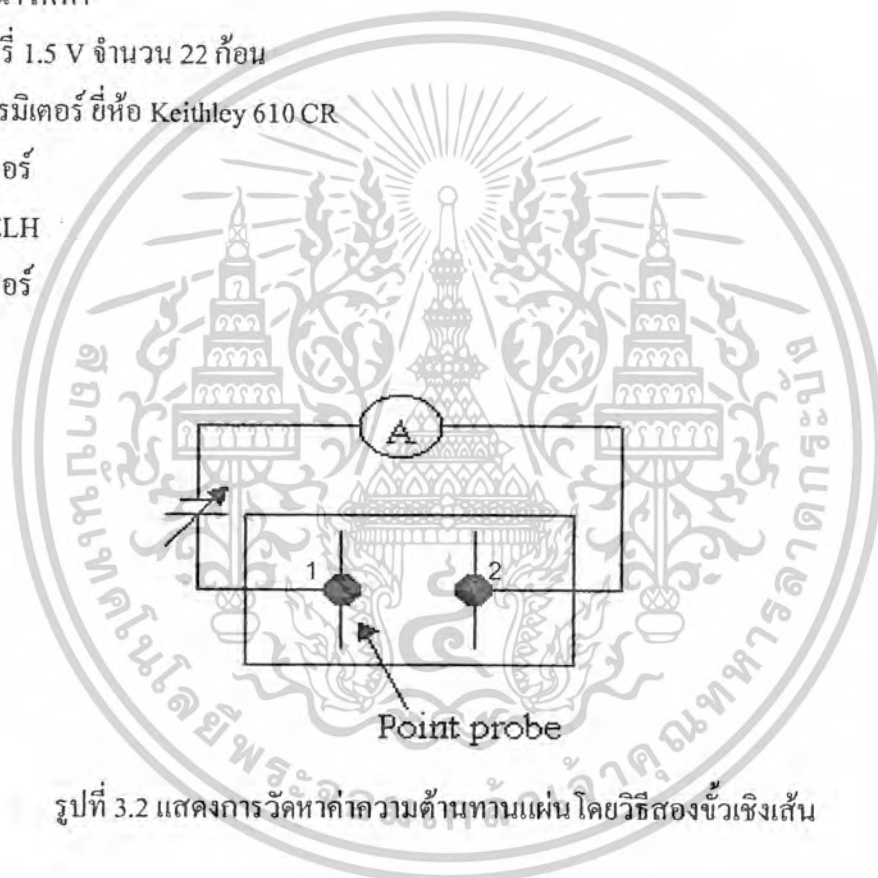
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 12) นำฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือและมีการเจือธาตุทรานซิชัน ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆมาทำการศึกษสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยเทคนิคการใช้ขั้วความร้อนและโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

3.1.4 วิธีการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่ 1.5 V จำนวน 22 ก้อน
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอด ELH
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 3.2 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

วิธีการทดลอง

- 1) นำฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni ตามลำดับทั้งที่ไม่มี การแอนนัล และมีการแอนนัลที่ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที นำมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินแฉกบนผิวหน้าของฟิล์มบางจำนวน 2 จุดหรือ 2 เส้น ขนานกันเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า
- 2) ต่อวงจรดังรูป 3.2 โดยให้มีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ขั้วที่ 1 และ 2 และใช้ลักซ์มิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ที่ขั้ว 1 และ 2 เช่นเดียวกันและใช้อิเล็กโตรมิเตอร์วัดกระแสที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ให้กับทงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำแผ่นชิ้นงานใส่แผ่นกล่องโลหะเพื่อลดสัญญาณรบกวน ทำการจ่ายกระแสให้กับวงจรโดยใช้แบตเตอรี่ก้อนจำนวน 14 ก้อน แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้ว 1 และ 2 ด้วยโวลต์มิเตอร์ และบันทึกค่ากระแสที่ไหลภายในวงจรจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์วัดค่ากระแสได้ในช่วงค่า 10^{-3} - 10^{-10} A
- 4) เพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรโดยการเปลี่ยนแรงดันจากแบตเตอรี่ 1 ก้อน ซึ่งมีค่าประมาณ 1.5 V เป็นแบตเตอรี่ 2 ก้อนต่ออนุกรมกัน ทำให้แรงดันอยู่ช่วง 18 V เปลี่ยนจนกระทั่งแบตเตอรี่ต่ออนุกรมกันครบ 14 ก้อน ซึ่งในการเพิ่มแบตเตอรี่แต่ละครั้งจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่าเพิ่มมากขึ้นและทำการบันทึกค่าความต่างศักย์และกระแส โดยการวัดค่าความต้านทานและกระแสประมาณ 10 ค่า
- 5) นำชิ้นสารตัวอย่างออกจากกล่องโลหะ และนำไปฉายแสงด้วยหลอดไฟชนิดฮาโลเจน ELH ขนาด 120 V, 300 W มีค่าความเข้มแสงประมาณ 100 mW/cm^2 ให้กับฟิล์มบาง โดยแหล่งจ่ายแรงดันยังคงเป็นแบตเตอรี่ก้อน และทำการวัดค่าความต่างศักย์โดยโวลต์มิเตอร์และวัดค่ากระแสด้วยอิเล็กทรอนิกส์
- 6) นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในแนวแกน x และความต่างศักย์ในแนวแกน y
- 7) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์สามารถที่จะหาค่าความต้านทานของฟิล์มบางได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V \cdot (W)}{I \cdot (L)}$$

โดยที่ W = ความกว้างของฟิล์มบาง

L = ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2

V/I = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง CdS พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายในบีกเกอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีหลังจากเติมไทโอยูเรียลงไป ในบีกเกอร์ที่มีสารละลายของเกลือแคดเมียมซัลเฟต โดยสารละลายจะปรากฏสีขาวขุ่นแล้วเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนและสีเหลืองเข้มอย่างรวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาประมาณ 50 วินาที และหลังจากจุ่มเป็นเวลา 60 วินาที จึงนำฟิล์มบางขึ้นมาจากสารละลาย สังเกตพบว่ามีอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์บางส่วนที่จับตัวเป็นคอลลอยด์เกาะอยู่ที่ผิวฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์เป็นจำนวนมากเกือบทั่วแผ่น แต่หลังจากเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแล้วเป่าให้แห้งจะสังเกตพบว่ามีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จะมีลักษณะผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ มีสีเหลืองส้ม เป็นมันวาว และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์พบว่าเนื้อฟิล์มบางเคลือบติดสม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ ผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2, 18, 19, 20]

รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส (as-deposited)

4.1.2 ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วย Fe จะมีปฏิกิริยาไฮโดรโมนิเอซิสเกิดเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับสารเจือตัวอื่นๆ กล่าวคือ จะสามารถสังเกตได้จากการที่สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในระยะเวลาสั้นกว่า 50 วินาที แสดงว่าจะมีอัตราการเกิดฟิล์มบางช้ากว่าอัตราการเกิดคอลลอยด์นั่นเอง แต่การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu จะมีปฏิกิริยาไฮโดรโมนิเอซิสเกิดเร็วแต่น้อยกว่าการเจือด้วยอะตอมของ Fe เล็กน้อย ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Co, Cr, และ Ni จะมีปฏิกิริยาไฮโดรโมนิเอซิสเกิดช้ากว่าฟิล์มบาง CdS ที่ยังไม่เจือเล็กน้อย ซึ่งสีของสารละลายที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นใบใช้จะขอขงดัดการคำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

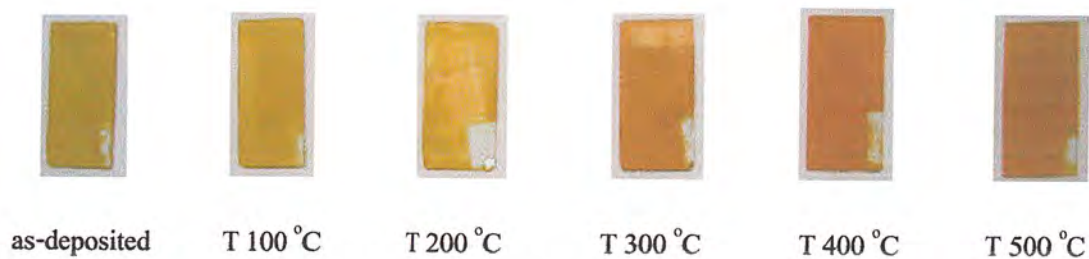
และ Cr พบว่ามีสีขาวขุ่นและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาลในอัตราเร็วที่ไม่แตกต่างกัน และสำหรับการเจือด้วย Fe พบว่าสารละลายจะเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นไปเป็นสีเหลืองส้ม แต่จะเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นไปเป็นสีน้ำตาลในกรณีที่มีการเจือด้วย Ni จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแดงเมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที โดยลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบติดกระจกสไลด์จะมีคอลลอยด์ติดอยู่เมื่อนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์สังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni จะมีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ หนามาก มีสีเหลืองแดง, ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, และ Cr จะมีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ หนาไม่มาก มีสีเหลืองน้ำตาล ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe จะมีลักษณะผิวหน้าไม่ค่อยเรียบสะท้อนแสงมีสีเหลืองส้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [20-25]



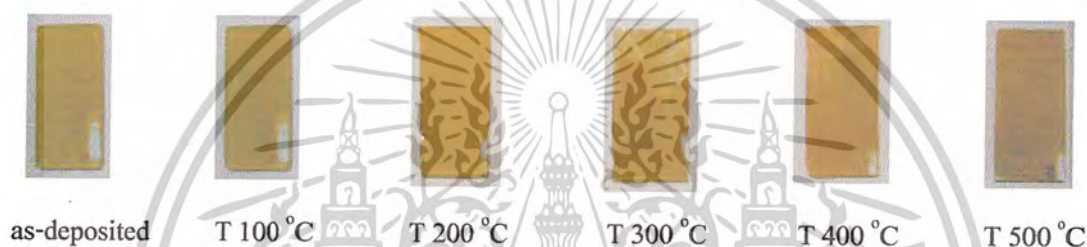
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni ที่เตรียมได้เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล

4.1.3 ฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

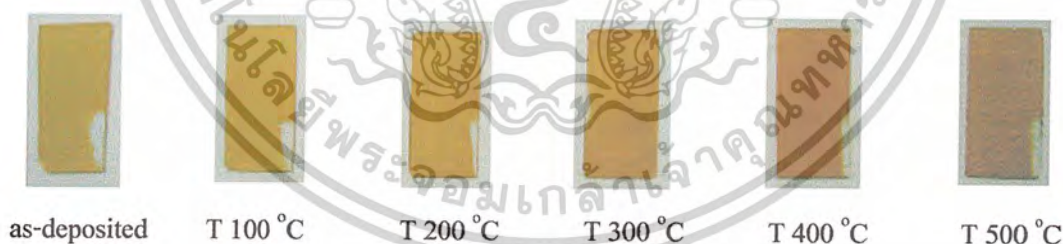
รูปที่ 4.3 ถึง 4.8 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าอุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้นฟิล์มบางจะมีสีเหลืองส้มและมีความเป็นมันวาวลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิแอนนัลประมาณ 300-500 °C จึงแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้อาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากเฟสคิวบิกไปเป็นเฮกซะโกนอล ดังที่พบได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2,9,15,18-30]



รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

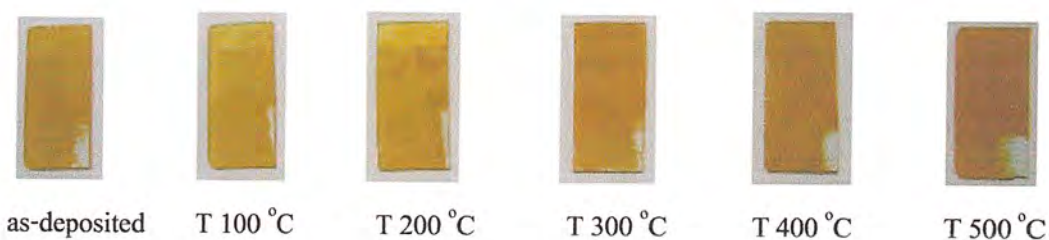


รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

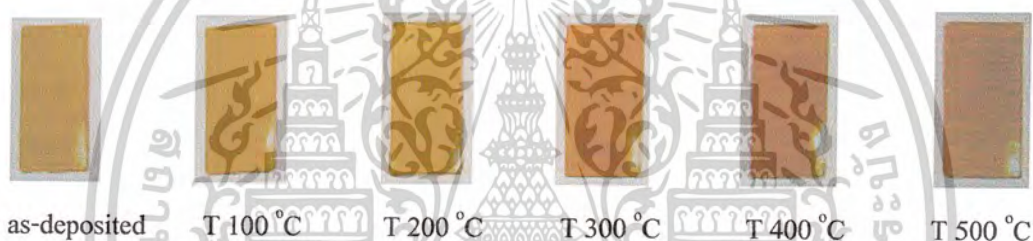


รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Co เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

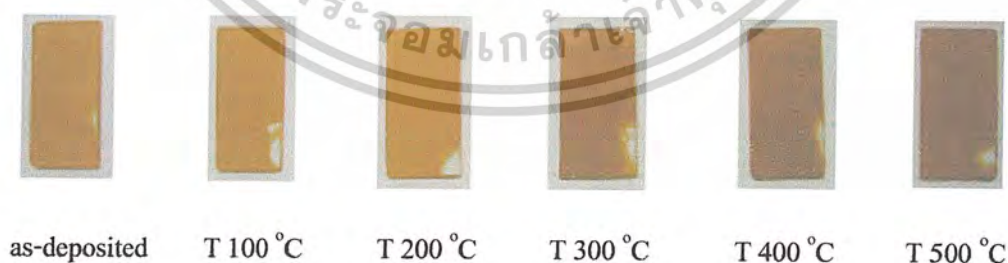
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.7 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

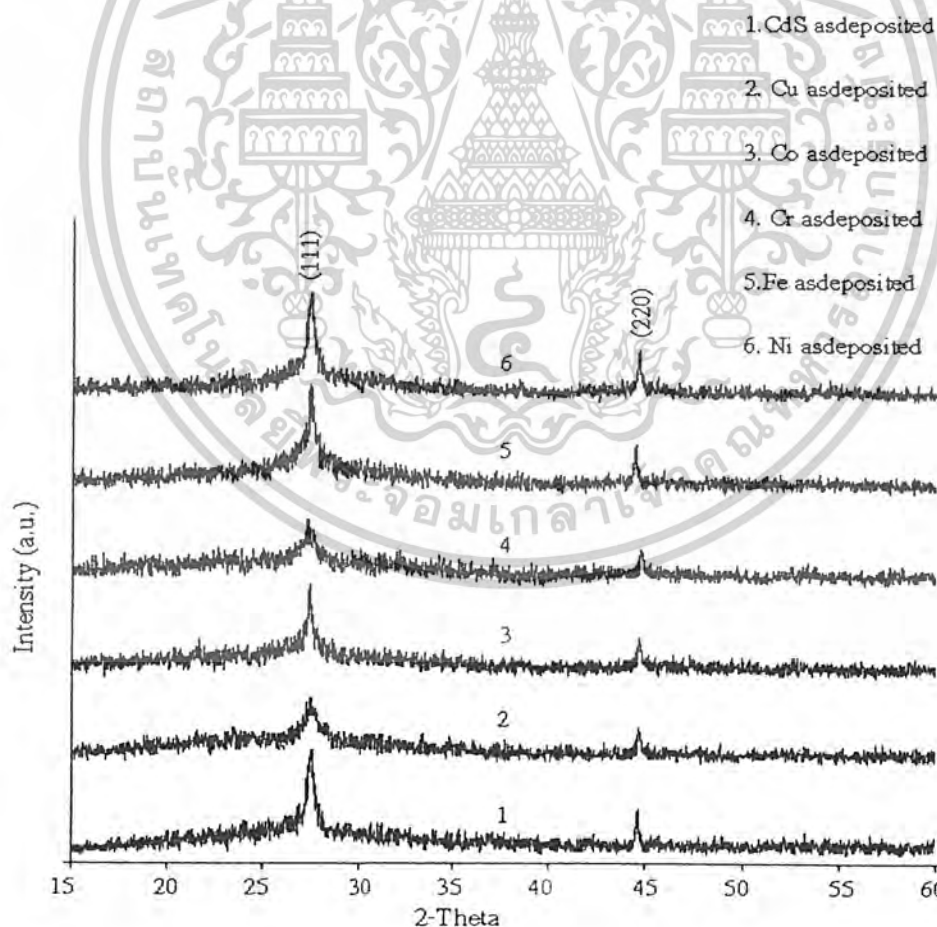


รูปที่ 4.8 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

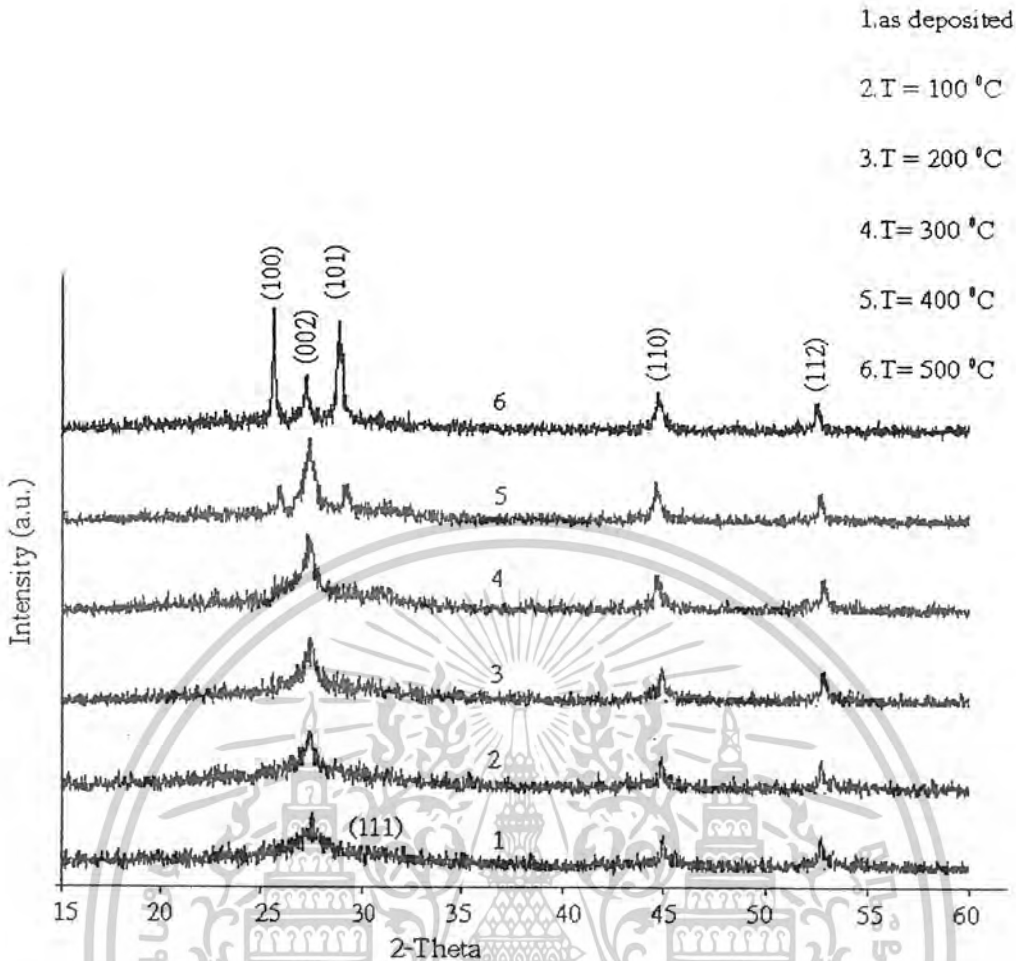
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตราฐาน เพื่อคว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นเป็นแบบใดซึ่งพบว่าผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [9,15,18-30] พิจารณารูปที่ 4.9 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni ที่เตรียมได้เมื่อยังไม่ผ่านการแอนนีส พบว่าเมื่อยังไม่มีการแอนนีสฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก ซึ่งส่วนใหญ่จัดเรียงตัวในทิศทางของระนาบ (111) ดังลากับแผ่นรองรับแต่ยังมีเฟสของเฮกซะโกนอลอยู่บ้างแต่เชื่อว่ามีปริมาณน้อยดังนั้นจึงแสดงว่ากระบวนการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) จะเด่นกว่ากระบวนการตกผลึกแบบเฮเทโรจีเนียส (heterogenous)



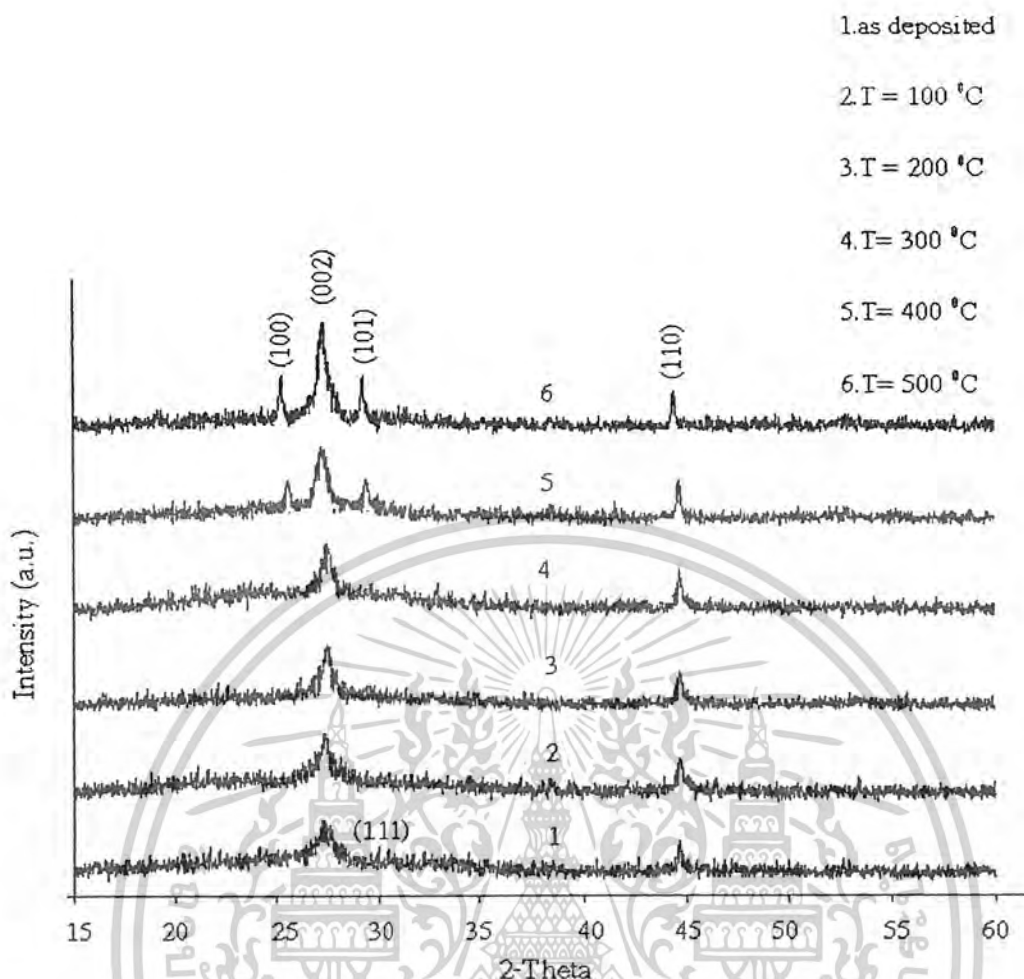
รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส ไม่นอญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ทั้งในกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100- 500 °C เป็นเวลา 20 นาที

รูปที่ 4.10 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Co เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที พบว่าเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 °C ขนาดของเกรนจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 200-500 °C ขนาดของเกรนจะโตขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิการแอนนีสจะทำให้ขนาดของเกรนโตขึ้น และโครงสร้างผลึกสมบูรณ์มากขึ้น มีความใกล้เคียงสโตยคิโอเมตริกมากขึ้น แต่ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนีสจะมีขนาดโตกว่าที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 200 °C ซึ่งอาจเนื่องมาจากบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางมีผงฝุ่นของ CdS ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโมจีเนียส ซึ่งโดยทั่วไปขนาดของคอลลอยด์มักมีเกรนขนาดโต [30] และคอลลอยด์เหล่านี้จะลดน้อยเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสสูงกว่า 200 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni ทั้งในกรณีเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100- 500 °C เป็นเวลา 20 นาที

รูปที่ 4.11 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งผลการทดลองทำนองเดียวกันกับกรณีที่เจือด้วย Co พบว่าเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-200 °C ขนาดของเกรนจะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เมื่ออุณหภูมิ 300-500 °C ขนาดของเกรนจะโตขึ้น และที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล [9,28,29] ซึ่งส่วนใหญ่จัดเรียงตัวในทิศทางของระนาบ (100), (002), (101),(110),(112) ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ แต่ที่ 500 °C พบว่าลักษณะมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของระนาบที่ (100) และ (101) มีความเข้มมากกว่าที่ 400 °C

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สามารถนำไปคำนวณหาขนาดของเกรน (crystal size) ได้ จากสมการที่ (4.1)

$$d = \frac{\lambda}{D \cos \theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ d = ขนาดของเกรน

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

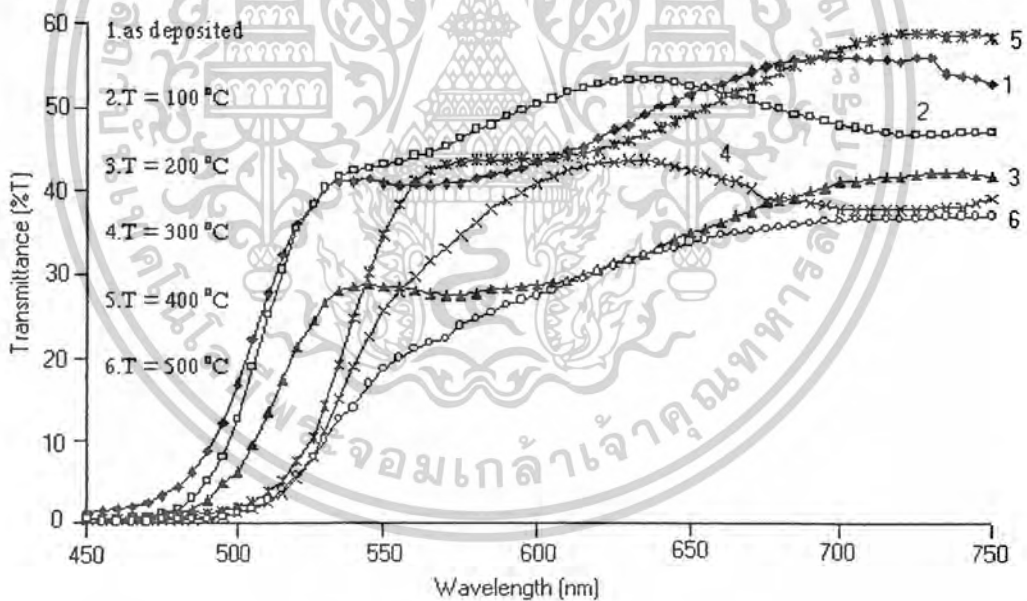
D = ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum : FWHM)

θ = มุมที่พีคของสเปกตรัม

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุทรานซิชันที่ยังไม่ได้มีการแอนนีกัล พบว่า CdS และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni มีขนาดของเกรนใกล้เคียงกันคือมีขนาดประมาณ 14 nm และ 12 nm แต่มีขนาดเล็กกว่าฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe, Co, Cr และ Cu ซึ่งมีขนาดประมาณ 19 nm, 25 nm, 30 nm และ 30 nm ตามลำดับ ส่วนกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอม Co และ Ni เมื่ออุณหภูมิการแอนนีกัลเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล ที่อุณหภูมิ 400 - 500 °C นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่แสดงไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม ยังพบว่าคอลลอยด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรโมลลิซิสที่ตกตะกอนอยู่ที่ก้นบีกเกอร์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก

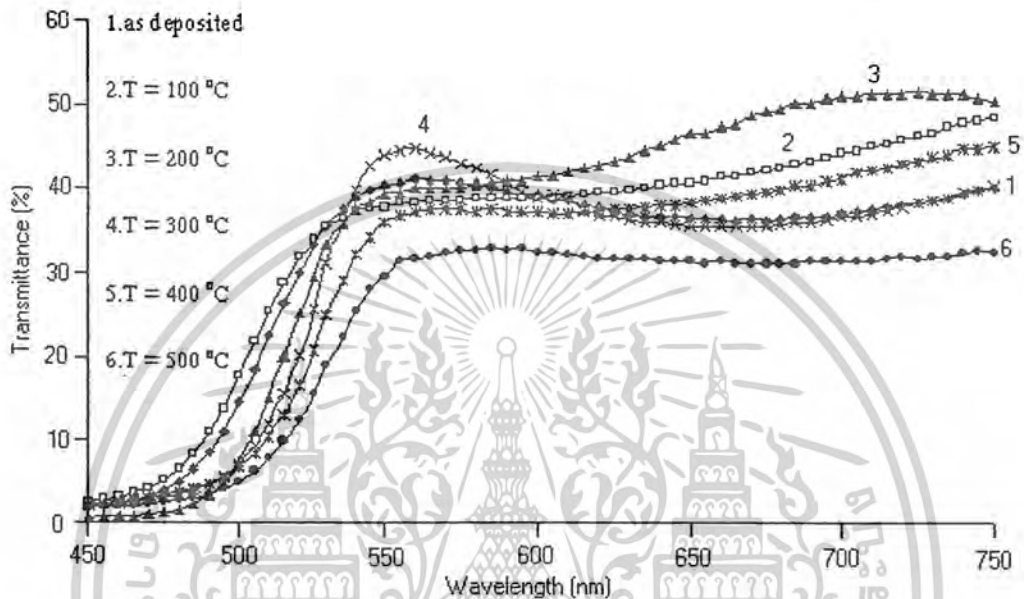
4.1.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เมื่อทำการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe, และ Ni เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการวัดด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อจัสโก้ รุ่น 7800 โดยเลือกความยาวคลื่นในช่วง 450-750 nm กล่าวคือผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ ผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2,7,16-25] ฟิล์มบาง CdS ธรรมดา ที่ยังไม่ผ่านการแอนนัลจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ แต่เมื่อแอนนัลฟิล์มบาง CdS ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบางจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 510 nm ผ่านไปได้ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge) จะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิ 400°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนกลับไปทางด้านความยาวคลื่นที่ลดลง ดังรูปที่ 4.12



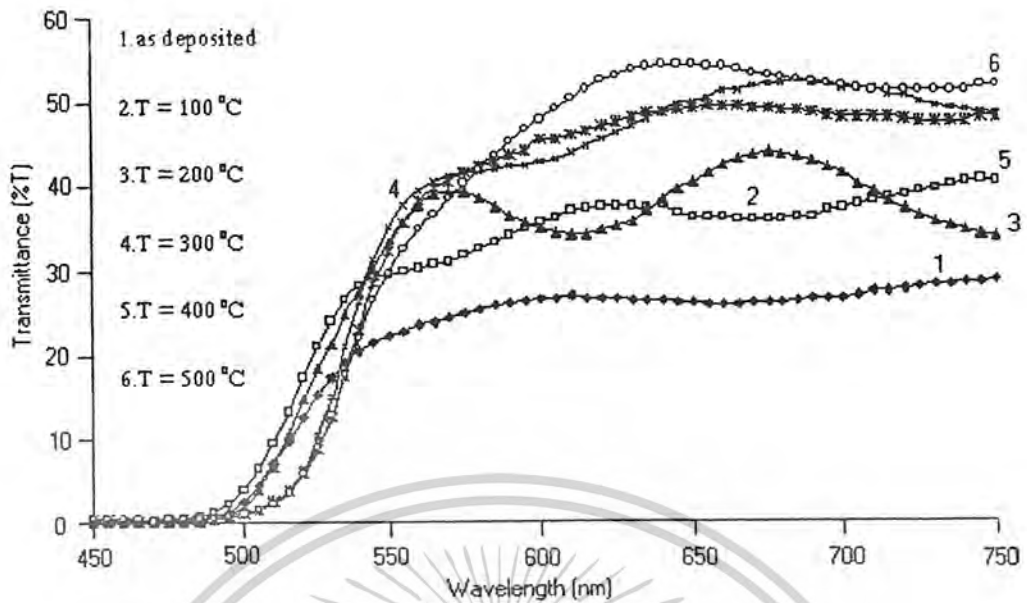
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450- 750 nm ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

ในกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสภายในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500^oC จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสเพิ่ม ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มากขึ้น ดังรูปที่ 4.13

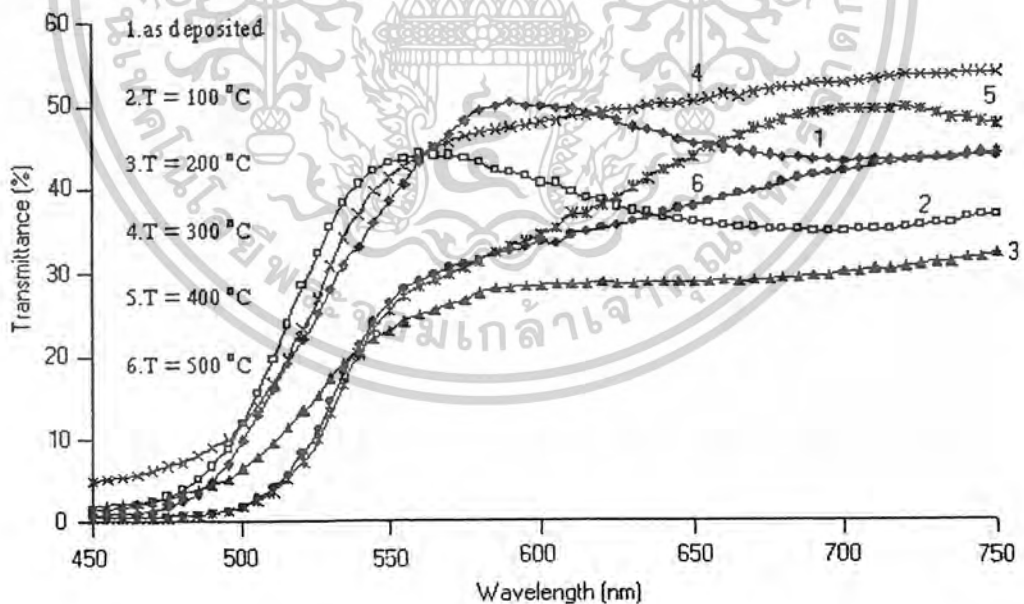


รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500^oC เป็นเวลา 20 นาที

ในกรณีของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni และ Fe ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและที่แอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500^oC พบว่า ที่ขอบการดูดกลืนพื้นฐานของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni และ Fe ที่ช่วงอุณหภูมิแอนนีสที่ 100^oC กับ 200^oC จะมีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเท่ากันหมด และที่ช่วงอุณหภูมิการแอนนีสที่ 300-500^oC ก็เช่นเดียวกัน คือค่าความยาวคลื่นในช่วงนี้จะมีความใกล้เคียงกันจนเกือบจะเท่ากันหมดดังรูปที่ 4.14



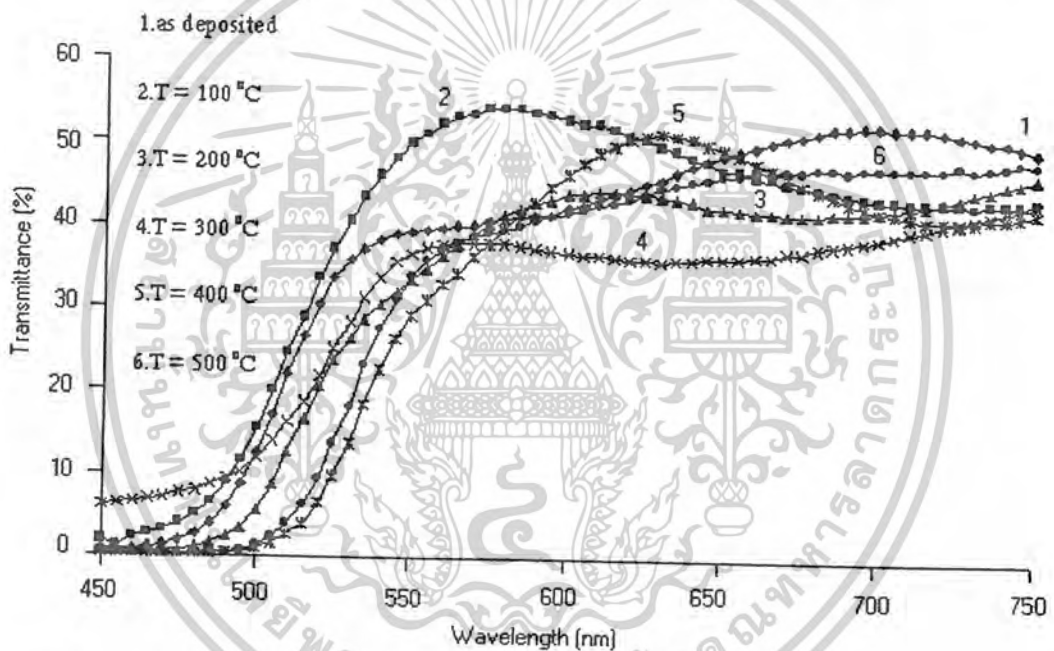
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

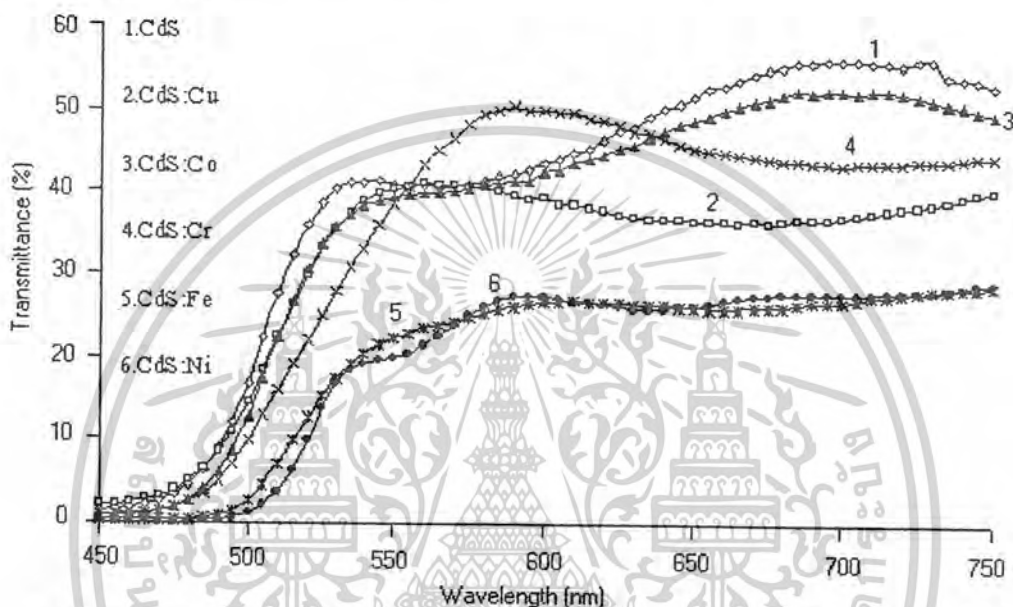
ส่วนในกรณีของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมธาตุ Co และ Cr ทั้งที่ไม่ได้แอนนัล และที่แอนนัลภายในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C พบว่าผลของการส่งผ่านแสงเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลเพิ่ม ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่ามากขึ้น จนกระทั่งที่อุณหภูมิการแอนนัลที่ 300 °C ขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่น้อยลงและมีค่าน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นของในกรณีที่ไม่ได้แอนนัลกับที่แอนนัลที่ 100°C และ 200°C และเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลเพิ่มเป็น 400°C และ 500°C พบว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นที่มากขึ้นและมากกว่าที่ 100°C , 200°C ดังรูปที่ 4.15 , 4.16



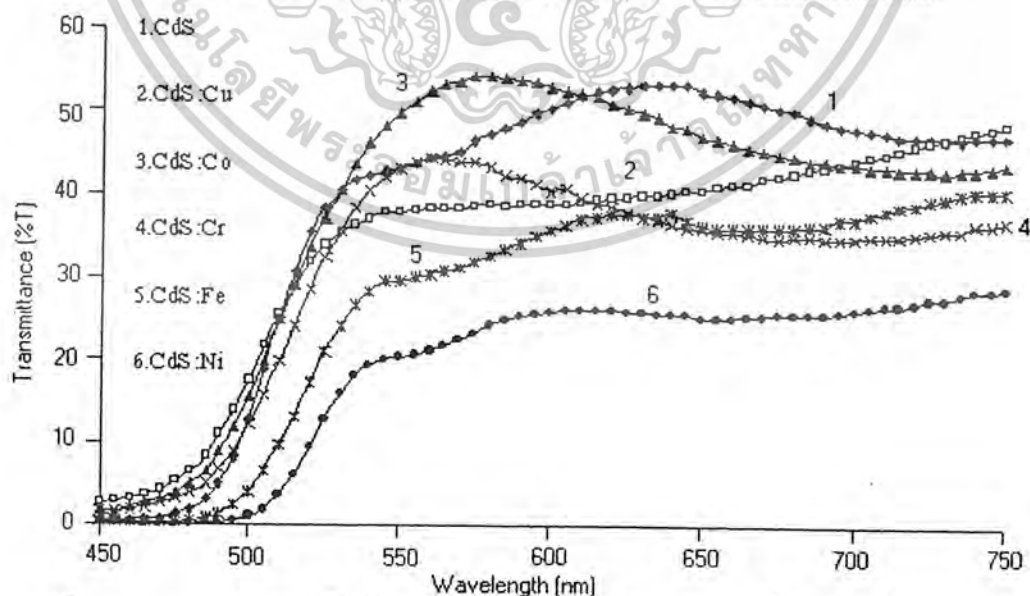
รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 450-750 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ทั้งที่ไม่ได้เจือและในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Ni และ Fe ในสถานะที่ไม่มีการแอนนัล จะพบว่าฟิล์มที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุดังกล่าวจะมีขอบการดูดกลืนพื้นฐานเลื่อนไปทางด้านค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เมื่อเทียบกับ CdS ธรรมดา การที่ขอบการดูดกลืนเลื่อนไปนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่า อะตอมของธาตุที่เจือเข้าไปมีผลต่อฟิล์มบางส่งผลให้ E_g ลดลง แต่เมื่อนำไปแอนนัลภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 100- 500°C พบว่าฟิล์มที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu,Co และ Cr ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่สั้นลงในทุกอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับ กรณี CdS ที่ไม่มีการเจือ แต่ในฟิล์มที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni และ Fe ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มากขึ้นในทุกอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับกรณี CdS ที่ไม่มีการเจือดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่ไม่มีการเจือและที่เจือด้วย อะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr ,Fe และ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล



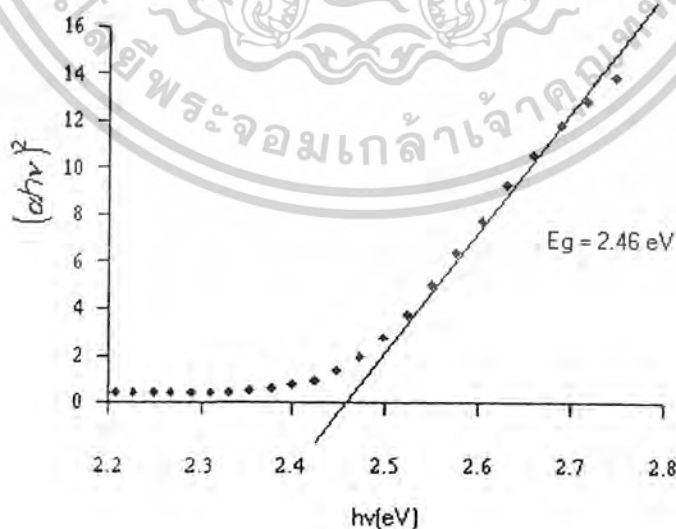
รูปที่ 4.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีการเจือ และในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Ni และ Fe เมื่อมี

การแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100°C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากฝ่ายวิชาการได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลการส่งผ่านแสงที่ได้มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{T}\right)$$

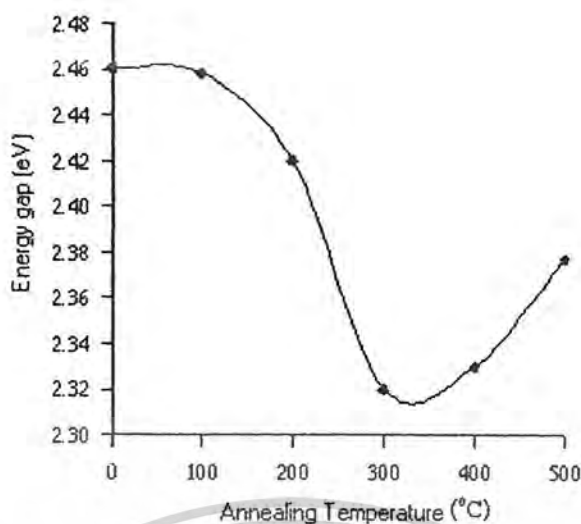
แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคูณพลังงานโฟตรอน $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตรอน (hv) พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ทั้งหมด จะแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นการแสดงว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตรอน ที่เท่ากับหรือมากกว่าขนาดของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จึงมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแบบ ไม่มีกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการแสดงว่าฟิล์มบาง CdS ทั้งหมดที่เตรียมได้มีลักษณะ โครงสร้างพลังงานเป็นแบบตรง และสามารถหาขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap: E_g) ได้จากการลากเส้นตรงต่อส่วนที่แสดงกราฟแบบเชิงเส้นไปตัดแกนพลังงานโฟตรอน โดยจุดตัดกราฟที่ได้ก็คือ ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ที่ไม่มีการแอนนีกัล จะมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานเท่ากับ 2.46 eV และจากผลการทดลอง เมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีกัลของฟิล์มบาง CdS ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS จะมีค่าลดลง และมีค่าต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัล 300°C จากนั้นเมื่ออุณหภูมิการแอนนีกัลสูงกว่า 300°C ค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$

กับพลังงานโฟตรอน (hv) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่ได้รับการแอนนีกัล

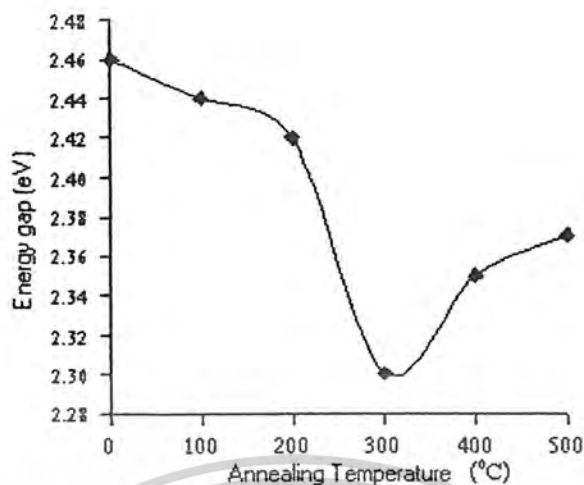
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการเจือ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนีส เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100- 500 °C เป็นเวลา 20 นาที

ส่วนผลของค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ โดยรวมๆแล้วส่วนใหญ่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส ค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าลดลง จนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิหนึ่ง ซึ่งในการทดลองนี้มักจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300°C และ 400°C ค่าของช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างเช่น ฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co และ Cr ผลที่ออกมาจะเหมือนกับฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการเจือทุกประการ คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีสค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าลดลง ไป จนถึงที่อุณหภูมิ 300°C ค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.21

ในกรณีของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe และ Ni ค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส จนกระทั่งที่อุณหภูมิการแอนนีสที่ 400°C ค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น และในกรณีของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu พบว่าผลของค่าช่องว่างของแถบพลังงานจะมีค่าลดลง ไป ไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส



รูปที่ 4.21 แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนัล เมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100- 500 °C เป็นเวลา 20 นาที

เพื่อให้เห็นค่าชัดเจนเราจึงทำตารางเปรียบเทียบค่าช่องว่างของแถบพลังงานกับอุณหภูมิการแอนนัลของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการเจือ และที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni เมื่อแอนนัลภายในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพลังงานช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) ของฟิล์มบาง CdS และฟิล์มบาง CdSที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดของฟิล์มบาง					
	CdS	CdS:Cu	CdS:Co	CdS:Cr	CdS:Fe	CdS:Ni
	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)
80	2.46	2.43	2.46	2.44	2.41	2.41
100	2.46	2.43	2.44	2.44	2.42	2.40
200	2.42	2.42	2.42	2.32	2.40	2.39
300	2.32	2.34	2.30	2.31	2.38	2.34
400	2.33	2.33	2.35	2.35	2.32	2.32
500	2.36	2.31	2.37	2.38	2.33	2.38

4.1.6 ผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุทรานซิชันต่างๆ

จากการทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการใช้ขั้วความร้อนของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ทั้งที่ไม่ได้เจือและที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni พบว่าผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 สอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2,7, 19-24,28,29]

ตารางที่ 4.2 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีส (°C)	ชนิดการนำไฟฟ้า					
	CdS	CdS:Cu	CdS:Co	CdS:Cr	CdS:Fe	CdS:Ni
as-deposited	n-type	n-type	n-type	n-type	n-type	p-type
100	n-type	n-type	n-type	n-type	p-type	p-type
200	n-type	n-type	n-type	n-type	p-type	p-type
300	n-type	n-type	n-type	n-type	p-type	p-type
400	n-type	n-type	n-type	n-type	n-type	p-type
500	n-type	n-type	n-type	n-type	n-type	n-type

กล่าวคือเมื่อเจือ Ni จะทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี ซึ่งอาจเกิดมาจาก Ni มีเลขออกซิเดชันเป็น Ni^{+1} มากกว่าจะเป็น Ni^{+2} ดังนั้น Ni^{+1} จะประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) แต่อย่างไรก็ตาม CdS มักจะมี V_s เสมอซึ่งประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ดังนั้นการเจือ Ni เข้าไปใน CdS จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำคอมเพนเซต (compensated semiconductor) โดยมีปริมาณของโฮลมากกว่าอิเล็กตรอน แต่เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C จะกลายเป็นชนิดเอ็น แสดงว่า V_s มีอิทธิพลโคเด่นกว่า Ni^{+1}

สำหรับกรณีที่เจือด้วย Fe ฟิล์มบางที่ยังไม่ได้มีการแอนนีสมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น แสดงว่าอะตอม Fe ยังไม่ได้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Cd อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมของ Fe จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของ Cd ที่มากขึ้น และประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับจึงทำให้ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น แต่เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสตั้งแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C ขึ้นไป ชนิดการนำไฟฟ้าเปลี่ยนกลับไปเป็นชนิดเอ็นแสดงว่า ระดับพลังงานผู้ให้ของ V_L มีอิทธิพลสูงกว่าระดับพลังงานผู้รับจากอะตอมของ Fe

โดยปกติการเจือด้วยอะตอม Cu ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้าจากชนิดเอ็นไปเป็นชนิดพีได้ แต่จากการทดลองไม่พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้า ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณสารเจือน้อยเกินไป ในทำนองเดียวกันการเจือด้วย Co และ Cr ก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจะแสดงว่าอะตอม Co และ Cr ประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัวมากกว่าที่จะเป็นกับคัลกิลีกรอน

4.1.7 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยธาตุทรานซิชันต่างๆ

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของฟิล์มบาง CdS ที่แอนนิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง พบว่าผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.23 กล่าวคือ เมื่อมีการแอนนิตที่อุณหภูมิ 200-300°C จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้ปริมาณขอบเขตของเกรนลดลง จึงทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง จนที่ประมาณ 200°C ความต้านทานแผ่นจะมีค่าต่ำสุด และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีขอบกพร่องของผลึกแบบอื่นมากกว่าขอบกพร่องผลึกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน เช่น ขอบกพร่องของผลึกที่เกิดเนื่องจากมีอะตอมของ S หลุดหายไป

ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni เมื่อแอนนิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ปริมาณขอบเขตของเกรนลดลง กระแสจึงไหลได้มากขึ้น ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นกับสัดส่วนเคมีเป็นสำคัญ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิการแอนนิตสูงขึ้นสัดส่วนทางเคมีระหว่าง Cd:S จะเข้าใกล้ 1:1 จึงทำให้โครงสร้างผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้นดังนั้นความต้านทานแผ่นจึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะที่มีการฉายแสง และขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	2.40×10^6	4.54×10^6	1.9
100	1.36×10^6	2.32×10^6	1.7
200	0.36×10^6	1.10×10^6	3.0
300	0.78×10^6	3.00×10^6	3.8
400	8.43×10^6	15.79×10^6	1.9
500	9.20×10^6	24.07×10^6	2.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	21.67×10^6	32.50×10^6	1.5
100	22.05×10^6	27.27×10^6	1.2
200	0.88×10^6	0.97×10^6	1.1
300	0.48×10^6	0.57×10^6	1.2
400	16.33×10^6	110.60×10^6	6.8
500	116.67×10^6	169.85×10^6	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	6.80×10^6	9.80×10^6	1.4
100	3.40×10^6	7.23×10^6	2.1
200	1.33×10^6	2.96×10^6	2.2
300	0.01×10^6	0.03×10^6	3.0
400	0.40×10^6	0.56×10^6	1.4
500	0.87×10^6	1.58×10^6	1.8

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะที่มีการฉายแสง และขณะที่ไม่มีการฉายแสง เมื่อมีการแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	17.20×10^6	28.76×10^6	1.7
100	7.80×10^6	18.60×10^6	2.4
200	2.26×10^6	8.50×10^6	3.8
300	0.09×10^6	0.13×10^6	1.4
400	62.50×10^6	156.50×10^6	2.5
500	96.30×10^6	288.89×10^6	3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนัล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1.05×10^6	1.75×10^6	1.7
100	0.96×10^6	1.05×10^6	1.1
200	0.73×10^6	0.96×10^6	1.3
300	0.46×10^6	0.76×10^6	1.6
400	7.27×10^6	19.44×10^6	2.7
500	9.20×10^6	55.20×10^6	6.0

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัล ขณะที่มีการฉายแสงและขณะที่ไม่มีการฉายแสงเมื่อมีการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนัล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	0.06×10^6	0.08×10^6	1.3
100	0.05×10^6	0.06×10^6	1.2
200	0.02×10^6	0.03×10^6	1.5
300	0.001×10^6	0.002×10^6	2.0
400	0.01×10^6	0.07×10^6	7.0
500	0.012×10^6	0.095×10^6	8.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแล้วนั้น เราสามารถที่จะนำไปคำนวณหาค่าดัชนีเชิงคุณภาพมากที่สุด (ξ_{max}) ซึ่งดัชนีเชิงคุณภาพมากที่สุดสามารถบอกประสิทธิภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยที่เมื่อ (ξ_{max}) มีค่ามากก็จะทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นด้วย

$$\xi = \frac{R_s}{\Delta E_g} = \frac{R_s(80^\circ C) - R_{smin}(TTA)}{E_g(80^\circ C) - E_g(TTA)}$$

เมื่อ $R_s(80^\circ C)$ = สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเมื่อไม่มีการแอนนีส

$R_{smin}(TTA)$ = สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเมื่อมีการแอนนีส

$E_g(80^\circ C)$ = ค่าช่องว่างของแถบพลังงานเมื่อไม่มีการแอนนีส

$E_g(TTA)$ = ค่าช่องว่างของแถบพลังงานเมื่อมีการแอนนีส ที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด

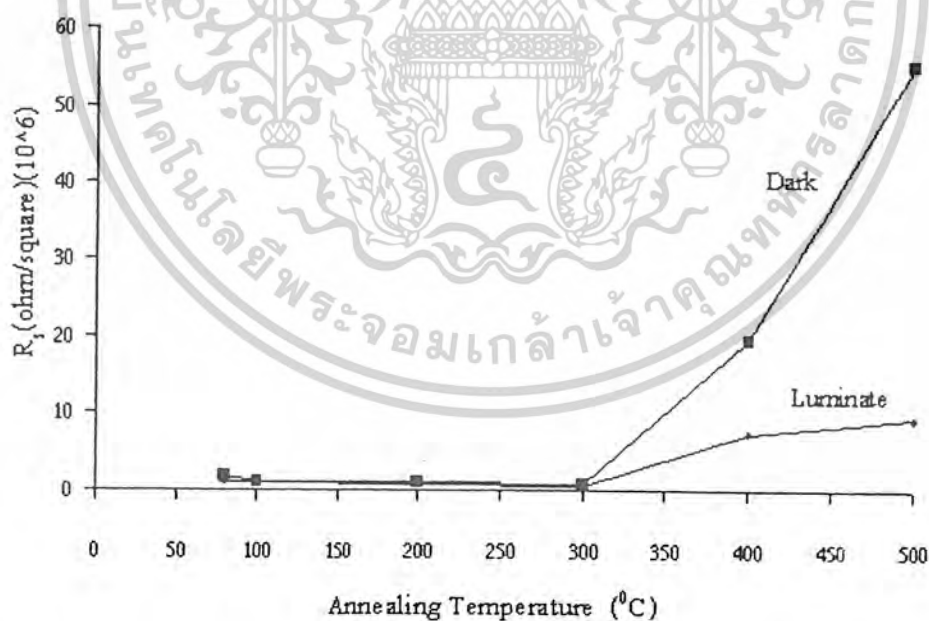
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่ไม่มีการเจือ และที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu และ Co ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีสเมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

พารามิเตอร์	ชนิดของสารเจือ					
	CdS		CdS:Cu		CdS:Co	
	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
TTA (°C)	200	200	300	300	300	300
$R_{smin}(80^\circ C)$	2.40×10^6	4.54×10^6	21.67×10^6	32.50×10^6	6.85×10^6	9.80×10^6
$R_{smin}(TTA)$	0.36×10^6	1.10×10^6	0.48×10^6	0.57×10^6	0.01×10^6	0.03×10^6
$E_g(80^\circ C)$	2.48	2.48	2.43	2.43	2.46	2.46
$E_g(TTA)$	2.42	2.42	2.34	2.34	2.30	2.30
$\xi_{max}(\Omega/\square eV)$	34.00×10^6	57.33×10^6	235.45×10^6	354.78×10^6	42.75×10^6	61.06×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

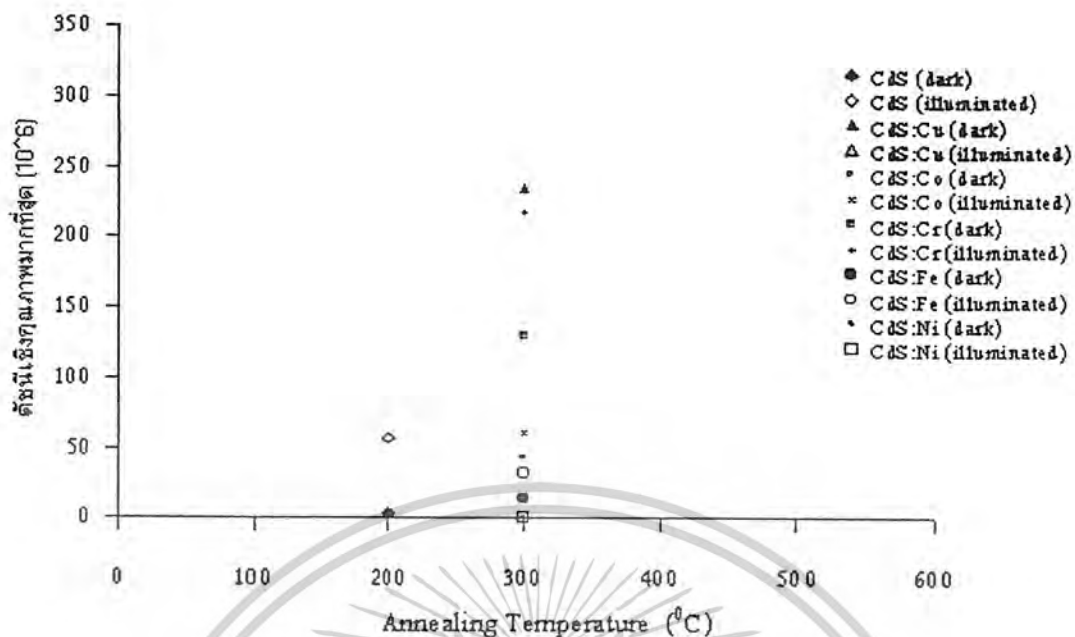
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr , Fe และ Ni ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีส เมื่อมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

พารามิเตอร์	ชนิดของสารเจือ					
	CdS:Cr		CdS:Fe		CdS:Ni	
	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
TTA (°C)	300	300	300	300	300	300
$R_{s\ min}$ (80°C)	17.20×10^6	28.76×10^6	1.05×10^6	1.75×10^6	0.06×10^6	0.08×10^6
$R_{s\ min}$ (TTA)	0.36×10^6	0.52×10^6	0.48×10^6	0.47×10^6	0.001×10^6	0.002×10^6
E_g (80°C)	2.44	2.44	2.42	2.42	2.41	2.41
E_g (TTA)	2.31	2.31	2.38	2.38	2.34	2.34
$\xi_{\ max}$ ($\Omega/\square eV$)	129.54×10^6	217.23×10^6	14.25×10^6	32.00×10^6	0.84×10^6	1.11×10^6



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเชิงคุณภาพมากที่สุดกับอุณหภูมิแอนนีสลิ่งในกรณีที่ไม่มีการฉายแสงและขณะที่มีการฉายแสง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

จากตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.10 นั้นเราอาจกล่าวได้ว่า ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni และ Fe ค่าความต้านทานทั้งในกรณีเมื่อมีการฉายแสงและในกรณีที่ไม่มีการฉายแสงมีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ธรรมดา ส่วนในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co และ Cr ค่าความต้านทานทั้งในกรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสงจะมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ธรรมดา ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2,7,16,15-30]

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาโครงการพิเศษ เป็นการเตรียมฟิล์มบาง CdS เป็นเวลา 60 นาที โดยฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้เมื่อ ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ ต่างๆและยังไม่ได้ผ่านการแอนนัล จะมีสีเหลืองส้ม โปร่งแสง มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni จะมีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ หนามาก มีสีเหลืองแดง, ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, และ Cr จะมีลักษณะผิวหน้าค่อนข้างเรียบกันสม่ำเสมอ หนาไม่มาก มีสีเหลืองน้ำตาล ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe จะมีลักษณะผิวหน้าไม่เรียบ สะท้อนแสงเป็นบางส่วน มีสีเหลืองส้ม

เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สีของฟิล์มบางเข้มขึ้น โดยจะสังเกตได้อย่างชัดเจนกับฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 °C ขึ้นไป ส่วนในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้นพบว่าในช่วงแรกปฏิกิริยาไฮโมจีเนียสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสังเกตได้จากสีของสารละลายที่เปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นและสีเหลืองอ่อนจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอย่างรวดเร็ว ในขั้นตอนสุดท้ายพบว่าเกิดคอลลอยด์สีส้มลอยอยู่ที่ผิวหน้าของสารละลายและปกคลุมอยู่บนฟิล์มบาง ซึ่งก็คือ คอลลอยด์ของ CdS ส่วนในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของ Fe จะมีปฏิกิริยาไฮโมจีเนียสเกิดเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับสารเจือตัวอื่นๆ กล่าวคือสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองในระยะเวลาที่สั้นกว่า 50 วินาที ส่งผลให้ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ค่อนข้างบาง แต่การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu จะมีปฏิกิริยาไฮโมจีเนียสเกิดเร็วน้อยกว่าการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe เล็กน้อย ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co, Cr และ Ni จะมีปฏิกิริยาไฮโมจีเนียสเกิดช้ากว่าฟิล์มบาง CdS ที่ยังไม่ได้เจือเล็กน้อย ซึ่งสีของสารละลายที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co และ Cr พบว่า มีสีขาวขุ่นแล้วเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาลในอัตราเร็วไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับการเจือด้วย Fe พบว่าสารละลายจะเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นไปเป็นสีเหลืองส้ม ส่วน Ni เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนัลมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก แต่เมื่อแอนนัลฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงขึ้น พิกการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111) จะเกิดขึ้น จนที่อุณหภูมิ 400 °C จำนวนพิกการเลี้ยวเบนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบาง CdS จะมีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิก ไปเป็นเฮกซะโกนอลที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C แต่สำหรับฟิล์มบางที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu และ Fe ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะมีความเข้มของพิกคลลงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่กว้างออกแสดงให้เห็นถึงความเป็นอะมอร์ฟัสของฟิล์มบางซึ่งเกรนจะมีขนาดเล็กมากเนื่องจากอะตอมของสารเจือเข้าไปแทรกบริเวณที่ว่างหรือเข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd ก็ได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [2,7,16-28] แต่ส่วนการเจือด้วย Ni สารละลายจะเปลี่ยนจากสีขาวขุ่น ไปเป็นสีน้ำเงินจากนั้นจะกลายเป็นสีเหลืองแดงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 วินาที

เมื่อนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดที่ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและพบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการแอนนีสล ขนาดของช่องว่างพลังงานที่เปลี่ยนไป อาจเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้ [2,7,18-25]

ก. โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันย่อมมีช่องว่างของแถบพลังงานที่แตกต่างกัน

ข. อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (disorder) ทำให้เกิดส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail)

ค. ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) หรือขนาดของเกรน

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300°C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีสลให้สูงขึ้นผลของขนาดควอนตัมมีผลมาก กล่าวคือ ขนาดของเกรน โดยเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแอนนีสลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าเป็นในกรณีที่ยังไม่ได้แอนนีสล ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเกรนมีขนาดเล็กมาก จนกระทั่งผลของขนาดควอนตัมแสดงออกมาให้เห็น (ส่วนผลในข้อ (ก) และ ข้อ (ข) ดูเหมือนจะไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้) สำหรับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล หรือกรณีที่อะตอมเปลี่ยนการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (disorder) ไปเป็นแบบมีระเบียบ (order) จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400°C ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C อะตอมจะจัดเรียงตัวอย่างเหมาะสม ทำให้ลดปัญหาจากส่วนหางของแถบพลังงานลงได้ ซึ่งก็คือค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น อีกทั้งของค่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลจะมีค่าสูงกว่าของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกประมาณ 0.1 eV [26] การเจืออะตอมของธาตุทรานซิชันลงในฟิล์มบาง CdS จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง เนื่องจากอะตอมของสารเจืออาจเข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd หรือเข้าไปแทรกในที่ว่างระหว่างอะตอมทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนรูปไป (deformation) ก่อให้เกิดระดับพลังงานของข้อบกพร่องผลึกปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Petre และคณะ [2,7,20-25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิคการใช้ขั้วความร้อนของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ทั้งที่ไม่ได้เจือและที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Co, Cr, Fe และ Ni กล่าวคือเมื่อเจือ Ni จะทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี ซึ่งอาจเกิดมาจาก Ni มีเลขออกซิเดชันเป็น Ni^{+1} มากกว่าจะเป็น Ni^{+2} ดังนั้น Ni^{+1} จะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) แต่อย่างไรก็ตาม CdS มักจะมี V_s เสมอซึ่งประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ดังนั้นการเจือ Ni เข้าไปใน CdS จะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำคอมเพนเสด (compensated semiconductor) โดยมีปริมาณของโฮลมากกว่าอิเล็กตรอน แต่เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิสูงกว่า $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะกลายเป็นชนิดเอ็น แสดงว่า V_s มีอิทธิพลโดดเด่นกว่า Ni^{+1}

สำหรับกรณีที่เจือด้วย Fe ฟิล์มบางที่ยังไม่ได้มีการแอนนีสมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น แสดงว่าอะตอม Fe ยังไม่ได้เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Cd อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมของ Fe จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของ Cd ที่มากขึ้น และประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับจึงทำให้ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น แต่เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสตั้งแต่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป ชนิดการนำไฟฟ้าเปลี่ยนกลับไปเป็นชนิดเอ็น แสดงว่า ระดับพลังงานผู้ให้ของ V_s มีอิทธิพลสูงกว่าระดับพลังงานผู้รับจากอะตอมของ Fe

โดยปกติการเจือด้วยอะตอม Cu ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้าจากชนิดเอ็นไปเป็นชนิดพีได้ แต่จากการทดลองไม่พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้า ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณสารเจือน้อยเกินไป ในทำนองเดียวกันการเจือด้วย Co และ Cr ก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจะแสดงว่าอะตอม Co และ Cr ประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัวมากกว่าที่จะเป็นกับดักอิเล็กตรอน

จากความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่วัดได้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิการแอนนีสประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานไว้ [2,7,9, 12-16,19-21,27-29] ค่าความต้านทานแผ่นอาจจะขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น

1. แวเคนซีของอะตอมซัลเฟอร์ (V_s)
2. อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ
3. สัดส่วนทางเคมี
4. ผลของควอนตัม หรือขนาดของเกรน ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิการแอนนีสเพิ่มขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนขอบเขตของเกรนลดลง อิเล็กตรอนหรือโฮลจึงไหลได้สะดวกยิ่งขึ้น
5. อะตอมของออกซิเจนที่ถูกจับไว้ที่ขอบของเกรนของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางยังขึ้นกับอิทธิพลของอะตอมออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณขอบของเกรนจนเกิดเป็นสารประกอบตัวอื่นๆ เช่น $CdSO_4$, CdO , CuO และ $CuSO_4$ ซึ่งสารประกอบออกไซด์เหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นจึงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นด้วย และการที่โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอาจก่อให้เกิดกับดักพลังงานปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน นอกจากนี้อะตอมของออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณขอบของเกรนยังประพืดตัวเป็นทั้งกับดักพาหะอิสระ หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะได้อีกด้วย

ในช่วงอุณหภูมิแอนนีสลต่ำกว่า $200^{\circ}C$ ความต้านทานแผ่นอาจจะขึ้นอยู่กับผลของขนาดของเกรน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิแอนนีสลเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นและจำนวนขอบของเกรนจะลดลง การกระเจิงของพาหะที่ขอบของเกรนจะลดลงตาม ทำให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น อีกทั้งการแอนนีสลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จะช่วยลดปริมาณอะตอมออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ขอบของเกรนด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $200^{\circ}C$ ความต้านทานแผ่นจะขึ้นกับสัดส่วนทางเคมีของ CdS เป็นสำคัญ โดยสัดส่วนทางเคมีของ Cd กับ S จะเข้าใกล้ 1 ต่อ 1 ปริมาณข้อบกพร่องผลึกจึงลดลงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น

แต่เมื่อมีการฉายแสงให้กับฟิล์มบาง CdS พาหะที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน รวมทั้งพาหะที่ไหลอยู่ในที่ว่างระหว่างเกรนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นจึงลดลงค่อนข้างมาก การเจืออะตอมของธาตุทรานซิชัน Cu , Co , และ Cr ลงในฟิล์มบาง CdS จะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Petre และคณะ [21] ที่ทำการเจือ Cu ลงในฟิล์มบาง CdS ซึ่งเชื่อว่าอะตอมของ Cu ทำหน้าที่เป็นกับดักอิเล็กตรอน ดังนั้นความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย Cu จึงมีค่าสูงแต่เมื่อมีการฉายแสงบนฟิล์มบาง ความต้านทานแผ่นจะลดลงเนื่องจากแสงไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากกับดัก (detrapping) ทำให้อิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเจืออะตอม Cu จึงทำให้การตอบสนองต่อแสงสูงขึ้น จากการทดลองของ Kasiyan และคณะ [27] พบว่าอะตอม Cu ที่เจืออยู่ในผลึกเดี่ยวของ $n-ZnSe$ มีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 ส่งผลให้เกิดระดับพลังงานของผู้รับ มีค่าพลังงานเท่ากับ 0.73 และ 0.35 eV ตามลำดับ ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าการเจืออะตอมของธาตุทรานซิชัน Cu , Co , Cr จะก่อให้เกิดเป็นระดับพลังงานของผู้รับปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนอิสระที่ได้จาก V_r จะมีปริมาณมากกว่า ดังนั้นฟิล์มบางทุกตัวจึงยังคงมีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดเอ็น ฟิล์มบางเหล่านี้จึงลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซต (compensated semiconductor) ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย Fe และ Ni จะมีความต้านทานแผ่นลดลง ซึ่งอาจเกิดมาจากข้อบกพร่องของผลึกชนิดอื่น เช่น V_r ที่แสดงผลเด่นกว่าการจับอิเล็กตรอนของอะตอม Fe และ Ni

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุทรานซิชัน Cu, Co, Cr, Fe และ Ni ที่อุณหภูมิการแอนนิต์ต่างๆ มีลักษณะคล้ายกับฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้มีการเจือสาร เพียงแต่ส่วนใหญ่จะมีความต้านทานแผ่นต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนิต 300 °C แทนที่จะเป็น 200 °C การเจือฟิล์มบาง CdS ด้วย Fe และ Ni และแอนนิตที่อุณหภูมิ 500 °C จะให้การตอบสนองต่อแสงดีที่สุด ส่วนการเจือด้วย Cu จะให้ดัชนีเชิงคุณภาพสูงสุด

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. คุณภาพฟิล์มบางขึ้นอยู่กับวิธีการกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ซ้อนทับกันเพราะจะทำให้กระจกสไลด์ถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
2. ขณะทำการเคลือบฟิล์มบาง ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไม่ควรเติมน้ำตลอดประจุเพื่อปรับปริมาณ เพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด
3. ควรมีการถ่ายภาพ SEM เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค
4. ควรใช้เทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. คุณิต เครื่องงาม, เซลล์แสงอาทิตย์. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์, สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542, หน้า 589-590.
2. Tomas, S.A., Vigil, O., Alvarrado-Gil, J.J., Lozada-Morales, R., Zelaya-Angel O., Vargas H. and Ferreira Da Silva A., "Influence of Thermal Annealing in Different Atmosphere on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS Thin Film", J. Appl. Phys78. (1995): 2204-2207.
3. 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.
4. Padiyan, D.P. and Radha, C.A., "Structural, Optical and Electrical Properties of Semiconducting ZnS Thin film.", Bulletin of Electrochemistry 14, (1998) : 391-393.
5. Torres, J., Cisneros, J.I., Gordillo, G. and Alvarez, F., "A Simple Method to Determine the Optical Constants and Thickness of $Zn_xCd_{1-x}S$ Thin Film", Thin Solid Film 289, (1996) :238-241.
6. Oladeji, I.O. and Chow, L., "A Study of the Ammonium Salts on Chemical Bath Deposited Zinc Sulfide Thin Films", Thin Solid Films 339, (1999) : 148-153.
7. Dona ,J.M. and Herrero, J., "Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Film Characterization", Thin Solid Film 268,(1995) : 5-12.
8. Dona, J.M., Herrero J., "Process and Film Characterization of Chemical Bath Deposited ZnS Thin Film", J.Electrochem.Soc. 141, (1994) : 205-210.
9. งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัชสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, "การเตรียมฟิล์มบางและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์",รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2545.
10. Kittel,C. 1971. in Introduction to Solid State Physics, 4th ed., pp. 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 611-612, 662-663. 614-676, John Wiley&Sons Inc., New York.
11. Cullity, B.D.. 1956. in Element of X-ray Diffraction, pp.9-14, Addison-Wesly Publishing Company Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. สิงหนเดช แดงจวง, “การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
13. Abelas, F. 1972. in *Optical Properties of Solids*, pp.23-40, North-Holland, London.
14. Runyan, W.R. 1975. in *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombay, New York.
15. วราภรณ์ ตั้งกิจเจริญวงศ์ และอุดมพร อุชชิน, “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์,โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2542.
16. จารุทัศน์ เดชะวิจิตราม, สาวตรี เปรมรัตน์วงศ์, หัสพร ทองแดง, “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์”, โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2543.
17. Paul O'Brien, John McAleese., “Developing an Understanding of the Processes Controlling the Chemical Bath Deposition of ZnS and CdS”, *J.Mater.Chem.* 8(11),(1998) : 2309-2314.
18. Oladeji, I.O. and Chow, L. “Optimization of Chemical Bath Deposited Cadmium Sulfide Thin Films”, *J.Electronic. Chem. Soc.*, 144 (1997): 2342-2345.
19. Gille,C. and Martinez, M.A., “Effect of Cd:S Ratio on the Photoconducting Properties of Chemically Deposited CdS Films”,*Materials Chemistry and Physics* 69 (2001): 125-132.
20. Sebastian, P.J. and Ocampo, M., “Modification of Structural and Opto-Electronic Properties of CdS Thin Films by Cu Doping”, *J. Appl. Phys.*77 (1995) : 4548-4550.
21. Pretre, D., Pintile, I., Pentia, E., Botia, T., “The Influence of Cu Doping on Opto-Electronic Properties of Chemically Deposited CdS”, *Materials Science and Engineering B58* (1999) : 238-243.
22. Rizakhanov, M.A., Emirov Yu, N., Gabibov F, S., Khamidov M, M., and Sheinkman M, K., “Nature of the Orange Luminescence Emitted from CdS:Ag Crystals”, *Sov. Phys. Semicond.* 12 (1978) : 794-796.
23. Ristova, M., Ristov, M., “Silver-Doped CdS Films for PV Application”, *Solar Energy Materials & Solar cell* 53 (1998) : 95-102.
24. Bobyl A, V. and Sheinkman M. K. “Multiply Charged Ni Impurity and Nanoradiative Recombination in CdS Crystals”, *Sov. Phys. Semicond.* 13(1979):1296-1299.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25. Bol, A. A. and Meuerink, A., "Factor Influencing the Luminescence Quantum Efficiency of Nonocrystalline ZnS:Mn²⁺", Phys. Stat. Sol. (2001) : 291-296.
26. Zehe, A and Luna, J.G.V. , "Magnetic field Influence Growth Kinetics in Chemical CdS Thin Film Deposition" Solar Eenergy Materials & Solar Cell, 68(2001) : 217-226.
27. Kasiyan, V.A., Nedeoglo D, D., and Nedeogle N, D. "Electrical Activity of Transition Metal Impurities in Zinc Selenide" Phys.Stat. Sol(a) 178, (2000) : 721-730.
28. Ramirez-Ban, R., Sandoval-Indra N, C., Espinoza-Beltr' an, F.J., Soteda-Lerma. M., Zelaya Angel, O. and Falcony, C., "Structural Transition of Chemically Deposited CdS Film on Thermal Annealing", J. Phys. Condens. Matter 9, (1997) ; 10051-10058.
29. Hernandez L., de Melo, O., Zelaya-Angel, O. and Lozada-Morales., "Electro Optical Characterization of Sulfur Annealed-Bath Deposited CdS Films",J. Electrochem Soc. 115, (1994) : 3238-3241.
30. Lee, J.H., Lee, H.Y., Kim, J.H. and Park, Y.K., "Heat Treatment of Boron-Doped CdS Films Prepared by Bath Deposition for Solar Cell Applications", Jpn. J.Appl. (2000) : 1669-1674.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

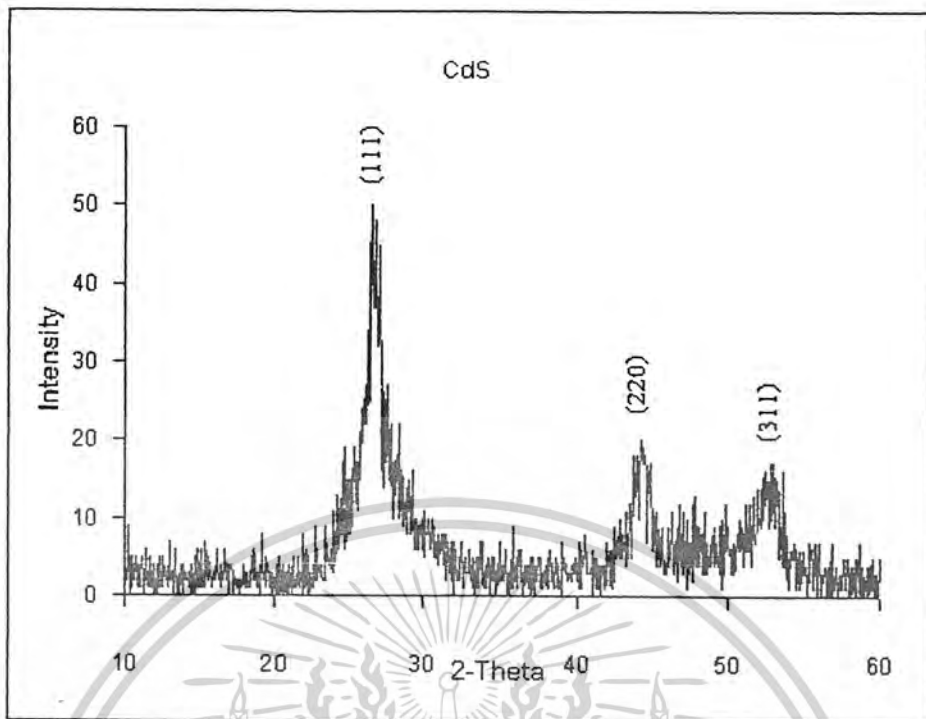
Pattern : 80-19			Radiation = 1.540593				
CdS			2th	l	h	k	l
			26.547	100	1	1	1
Cadmium Sulfide			30.743	22	2	0	0
Lattice: Face-centered cubic		Mol.weight = 144.47	44.040	47	2	2	0
S.G.:F-43m (216)		Volume = 196.22	52.163	33	3	1	1
a= 5.81100		Dx=4.890	54.071	5	2	2	2
			64.043	6	4	0	0
			70.594	10	3	3	1
			72.715	4	4	2	0
	Z=4	l/cor=14.06	80.993	10	4	2	2
			87.059	6	5	1	1
Pattern:75-1545			Radiation = 1.540598				
CdS			2th	l	h	k	l
			24.801	63	1	0	0
Cadmium Sulfide			26.490	44	0	0	2
Lattice: Hexagonal		Mol.weight = 144.47	28.173	100	1	0	1
S.G:P63mc (186)		Volume = 99.90	36.604	25	1	0	2
a=4.14200		Dx=4.803	43.671	43	1	1	0
			47.814	41	1	0	3
			50.870	6	2	0	0
			51.806	30	1	1	2
			52.783	14	2	0	1
			54.547	2	0	0	4
			58.258	5	2	0	2
			60.803	2	1	0	4
			66.743	12	2	0	3
			69.234	8	2	1	0
			70.843	9	2	1	1
			72.341	4	1	1	4
			75.429	8	1	0	5
			75.557	5	2	1	2
			77.812	1	2	0	4
			80.216	4	3	0	0
			83.214	10	2	1	3
			86.276	4	3	0	2
			86.842	1	0	0	6
	Z=2	l/cor=7.99					
c=6.72400							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

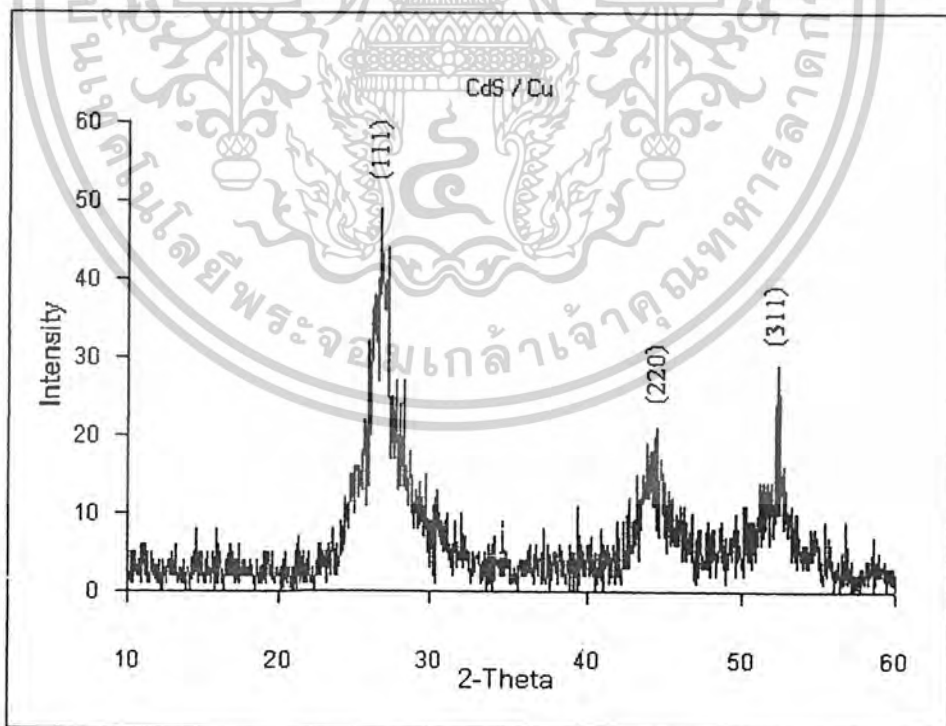
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern:1-1049			Radiation = 1.540800				
CdO			2th	l	h	k	l
			33.153	100	1	1	1
Cadmium Oxide			38.439	100	2	0	0
Lattice: Face-centered cubic			55.660	100	2	2	0
S.G: Fm3m (225)			63.229	75	3	1	1
A=4.68900			69.583	30	2	2	2
Dx=8.273			82.352	15	4	0	0
Dm=8.150			90.998	30	3	3	1
Z= 4			94.381	40	4	2	0
			106.719	25	4	2	2
			117.716	18	5	1	1
			136.273	2	4	4	0
			154.355	15	5	3	1
			161.909	10	6	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



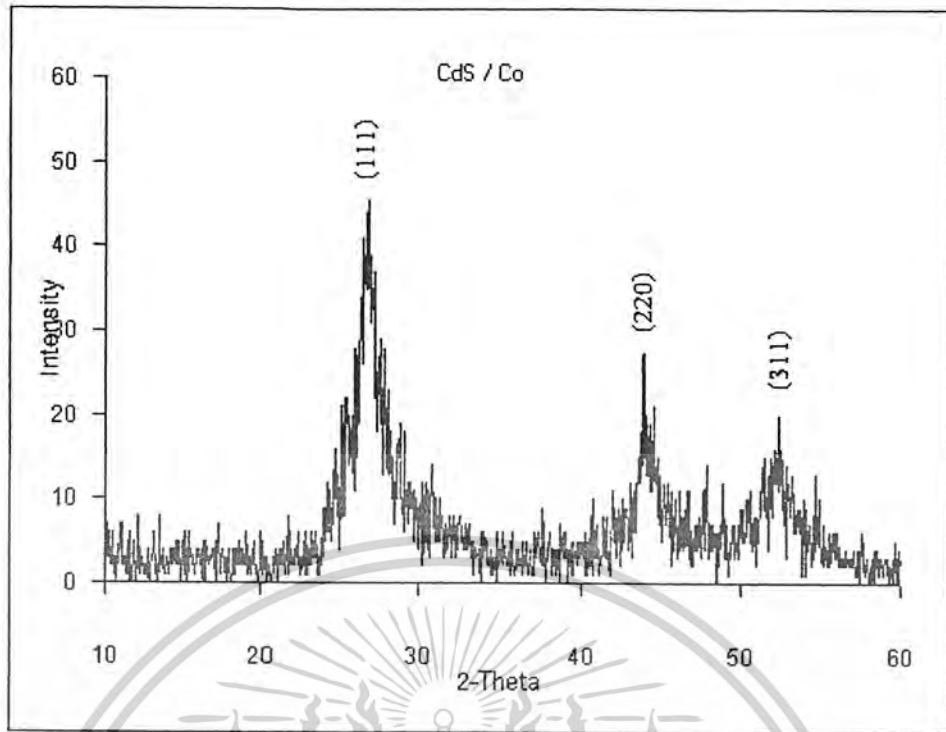
รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เตรียมได้ด้วยวิธี
ออบสารละลายเคมี



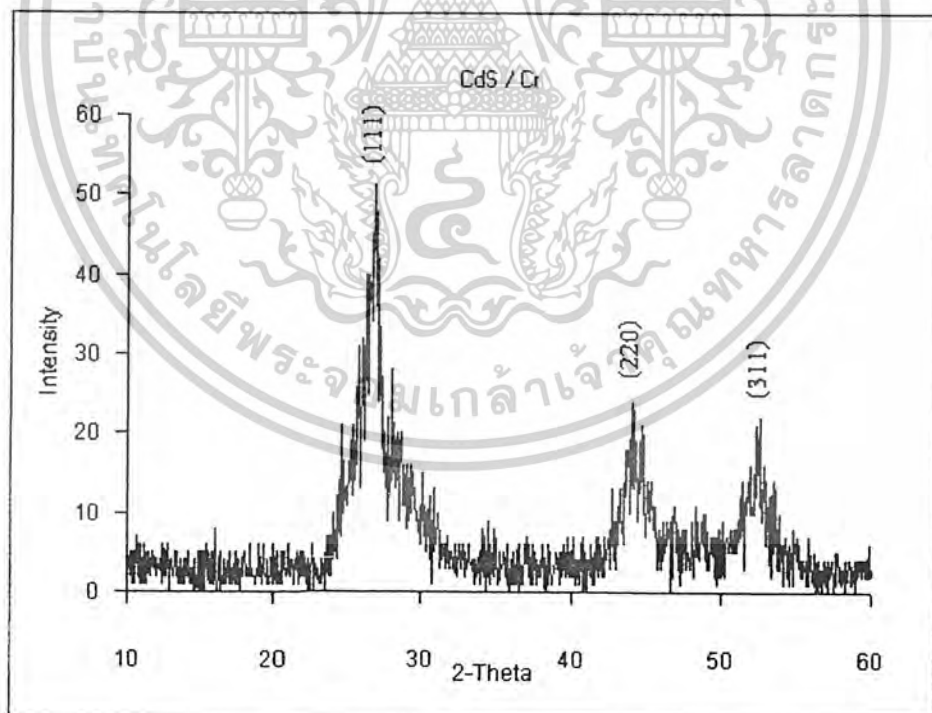
รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ

Cu ที่เตรียมได้ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

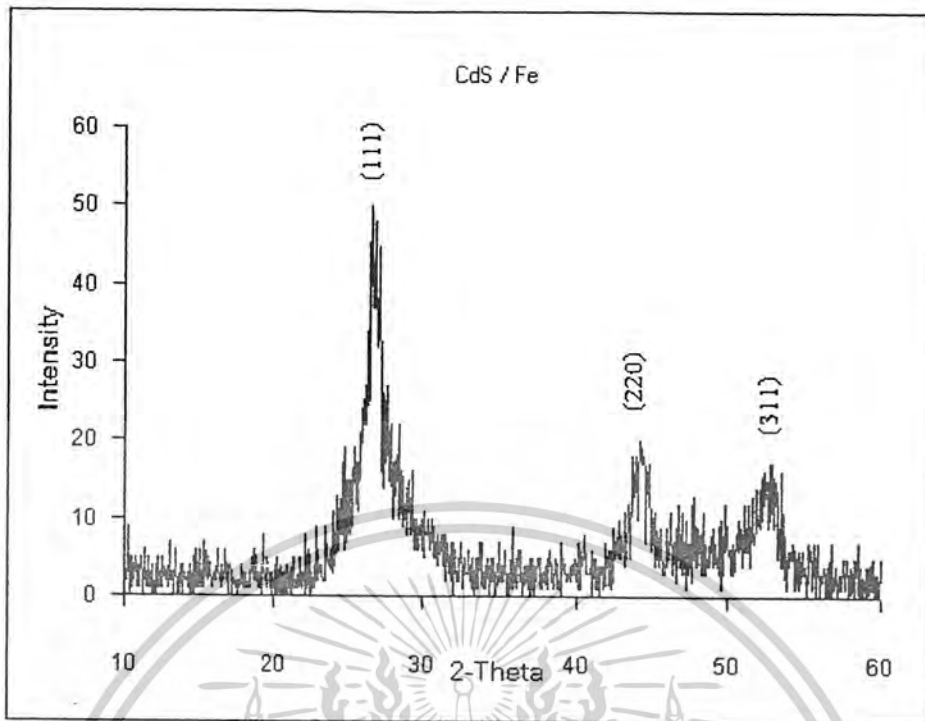


รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Co ที่เตรียมได้ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี

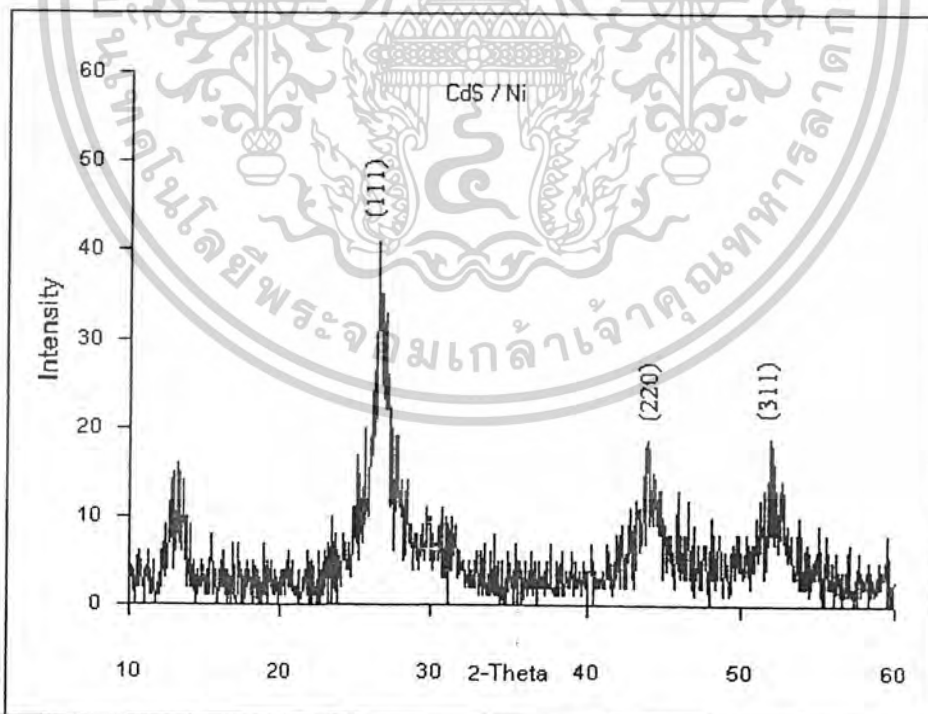


รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr ที่เตรียมได้ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Fe ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี



รูปแสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคอลลอยด์ CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ni ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติ

นาย กฤษณฉล ชุมสาย ฌอชญา เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 เป็นคนชลบุรี โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียน สาธิต 'พิบูลย์บำเพ็ญ' มหาวิทยาลัยบูรพา และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

นางสาว ธิราพร เปรมจิตต์สุกนธ์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2523 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียน ชางคากรู้สคอนแวนท์ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

นางสาว สติลาพัฒน์ เปรมจิตต์ชื่น เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2524 เป็นคนสมุทรปราการ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียนนวมินทราชินูทิศสวนกุหลาบ วิทยาลัยสมุทรปราการ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ในสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้