

ผลของการแอนนีสด้วยความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS



เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 43955
วัน, เดือน, ปี 8 ต.ค. 2545

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

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Effect of Thermal Annealing on the Properties of CdS Thin Films

Miss Waraporn Tungkiycharoenvong

Mr. Udomporn Ujjin

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

2001


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของการแอนนีลด้วยความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS
โดย นางสาววราภรณ์ ตั้งกิจเจริญวงศ์ รหัสประจำตัว 41054056
นายอุดมพร อูชชิน รหัสประจำตัว 41054085

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
รศ.งามนิตย์ แก้วแดง
ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

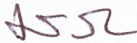

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชานู เดชิตีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง)

ประธานกรรมการ

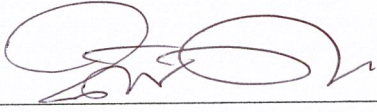

(รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

กรรมการ


(ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ)

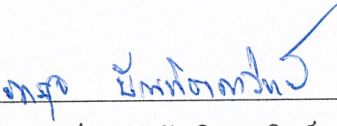
กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(อาจารย์ บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์)

กรรมการ



(อาจารย์ ภารุจ บันฑิธาดาวิทย์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของการแอนนัลด้วยความร้อนที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS
โดย นางสาวราภรณ์ ตั้งกิจเจริญวงศ์ รหัสประจำตัว 41054056
นายอุดมพร อุชชิน รหัสประจำตัว 41054085

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
รศ. งามนิตย์ แก้วแดง
ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอบสารละลายเคมีโดยเคลือบบนกระจกสไลด์ ซึ่งสารตั้งต้นประกอบด้วย $CdSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_3 โดยเตรียมที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ $100-500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของอาร์กอน, ซัลเฟอร์, สูญญากาศ ที่ความดันประมาณ 0.1 mbar และในอากาศ เป็นเวลาประมาณ 20 นาที ซึ่งจากผลการศึกษการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ยังไม่ผ่านการแอนนัลพบว่า จะปรากฏพีคเนื่องจากการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แต่เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงกว่า $400^\circ C$ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนจะเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ส่วนขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและความต้านทานของฟิล์มบาง CdS จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล รวมทั้งยังได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag อีกด้วย

Special Project Title The Effect of Thermal Annealing on the Properties of CdS
Thin Films

Name Miss Waraporn Tungkiycharoenvong
Mr. Udomporn Ujjin

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

Department Applied Physics Faculty of Science

Academic Year 2001

Abstract

In this special project, CdS thin films have been deposited on the glass slide substrates by the chemical bath deposition technique at 80 °C for 60 min. The solution in the reaction bath consists of CdSO₄, SC(NH₂)₂ and NH₃ in deionized water. The as-deposited films were annealed in Ar, S₂, vacuum and in air about 0.1 mbar at the temperature ranging from 100-500 °C for 20 min. From XRD patterns, only one diffraction peak which can be attributed to (111) diffraction of cubic CdS structure. At annealing temperature higher than 400 °C, many diffraction peaks can be observed which corresponds to hexagonal structure. The variation of energy gap and sheet resistance as a function of annealing temperature are observed. Some properties of Cu-doped, Mn-doped and Ag-doped CdS thin films are also investigated.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง และ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ ที่เอื้ออำนวย ความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและ การให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงษ์ สรวงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ ใช้เครื่องซังสาร , กล้องโลหะลัดสัญญาณรบกวนและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้อง จุลทรรศน์ , เครื่องกวนสารละลายยาเคมี และ ตู้อบอุณหภูมิสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้ใช้กล้องดิจิทัลเพื่อใช้ในการถ่ายรูปและจัดสรรเงินของภาควิชาเพื่อใช้ในการจัดทำโครงการ พิเศษ

ขอขอบคุณ อาจารย์ บดินทร์ ดำรงค์ดี ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณศิริพรรณ จันทราสกุล จากศูนย์ วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง surface profiler ยี่ห้อ Dektak³ st ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณกัญญา ศิริโกชน์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ ใช้เครื่องยูวี-จัสโก๊ ดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก๊ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV / visible spectrometer JUSCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่าน แสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน สุขน้อย และดร.ปทุมมา วรพจน์พิศุทธิ ภาควิชา เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ คำแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำพลอดประจุมใช้ในการทดลองโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร โอสดจันทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดมรอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี พุฒพัฒน์ และคุณรวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์เฟรคโทรมิเตอร์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ และคุณจรินทร์ โพธิไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ นาย วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อหาผลการทดลอง

ขอขอบคุณ นาย ธีรัฐพล บัวเอี่ยม และนาย ชาญ เชาวน์ปฏิภาณ ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม Photoshop

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การอุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 โครงสร้างผลึกและโครงสร้างแถบพลังงาน	4
2.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	5
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	6
2.2 โครงสร้างแถบพลังงานแคดเมียมซัลไฟด์	7
2.3 ดัชนีมิลเลอร์	8
2.3.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	8
2.3.2 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะโกนอลโคลสแพค	9
2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง	10
2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี	10
2.4.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	11
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	11
2.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	11
2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	12
2.5.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	12
2.5.4 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไฮท์	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	14
3.1 การเกิดสีของผลึก	14
3.2 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	16
3.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	18
3.4 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	18
บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้า	20
4.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล	20
4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	20
4.2.1 การวัดโดยตรง	20
4.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว	21
4.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	21
4.2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	23
บทที่ 5 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีการอบสารละลายเคมี	25
5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	25
5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ	26
บทที่ 6 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	27
6.1 วิธีการทดลอง	27
6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	27
6.1.2 การเตรียมแผ่นรองรับ	28
6.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS	29
6.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
6.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	31
6.2.2 ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆที่เตรียมได้	31
6.2.3 ฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ	32
6.2.4 ผลการวัดการเคลื่อนเบนรังสีเอ็กซ์	34
6.2.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.3 วิธีการทดลองและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น	45
6.3.1 อุปกรณ์	45
6.3.2 วิธีการทดลอง	45
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	55
ภาคผนวก	57
ประวัติผู้เขียน	61
เอกสารอ้างอิง	62



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการ ออบสารละลายเคมี ในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 ml	28
ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที	43
ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์ม บาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag เมื่อแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	44
ตารางที่ 6.4 แสดงความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเคลือบ 1-3 ครั้ง และความหนา ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag ที่มีการเคลือบ 3 ครั้ง	44
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีกัลภายใต้ บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	46
ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลภายใต้ บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	47
ตารางที่ 6.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลในสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	47
ตารางที่ 6.8 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลในอากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	48

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 6.9 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	48
ตารางที่ 6.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีกัล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	49
ตารางที่ 6.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	49
ตารางที่ 6.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีกัล (T) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar และ S ₂	50
ตารางที่ 6.13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีกัล (T) ในสูญญากาศและอากาศ	50
ตารางที่ 6.14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn , Ag ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีกัล (T) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์	51
ตารางที่ 6.15 แสดงค่า ξ_{max} ของฟิล์มบาง CdS ที่แอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที	52

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึก ในระบบ 2 มิติ	
ก. แบบออร์เตอร์หรือแบบออร์เตอร์ระยะยาว	
ข. แบบคิสออร์เตอร์	
ค. แบบออร์เตอร์ระยะสั้น	5
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	5
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	5
รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอม	
ก. แบบซิงค์เบลนด์	
ข. เวิร์ทไซท์	6
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์	6
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่เกิดการค้ำปดิ่ง ระหว่างสปีน-ออร์บิต	7
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่เกิดการค้ำปดิ่ง ระหว่างสปีน-ออร์บิต	7
รูปที่ 2.8 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	8
รูปที่ 2.9 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โคลสแพค	9
รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี	
ก. ชนิดชอตตี้	
ข. ชนิดเฟรนเคิล	10
รูปที่ 2.11 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	11
รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์	12
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆที่ เป็นอินทรีนสิก	
ก. ฉนวน	
ข. สารกึ่งตัวนำ	
ค. ตัวนำ	15

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 แสดงการย้ายสถานะพลังงานของพาหะเมื่อผลึกมีโครงสร้าง แถบพลังงานแบบตรง	17
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการผ่านแสงในสารตัวอย่าง	19
รูปที่ 4.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว	21
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดสภาพต้านทานแผ่นแบบสี่ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง	22
รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของฟิล์มบางยาว l กว้าง w หนา d	22
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	
ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง	
ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด	23
รูปที่ 4.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	24
รูปที่ 6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้การเตรียมฟิล์มบาง CdS	28
รูปที่ 6.2 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้และยังไม่ผ่านการแอนนिल	31
รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ที่เตรียมได้เมื่อยังไม่ผ่านการแอนนिल	32
รูปที่ 6.4 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนिलภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	32
รูปที่ 6.5 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนिलภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	32
รูปที่ 6.6 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนिलภายใต้สุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	33
รูปที่ 6.7 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนिलในอากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	33
รูปที่ 6.8 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อแอนนिल ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	34
รูปที่ 6.9 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn เมื่อแอนนिल ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	34

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.10 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag เมื่อที่แอนนีสล ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที	34
รูปที่ 6.11 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีสล และมีการ แอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้อุณหภูมิของ ก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที	36
รูปที่ 6.12 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีสล และมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที	36
รูปที่ 6.13 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอม ของธาตุ Ag ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	37
รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้อุณหภูมิของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที	39
รูปที่ 6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที	39
รูปที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ทั้งในกรณีที่ไม่มี การแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้อุณหภูมิของ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	40
รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ทั้งในกรณีที่ไม่มี การแอนนีสลและมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้อุณหภูมิของ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	40
รูปที่ 6.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการแอนนีสล	42

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.19 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนีกัล เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที	42
รูปที่ 6.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนีกัล เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	43
รูปที่ 6.21 แสดงการวัดหาค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	45
รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเชิงคุณภาพมากสุดกับอุณหภูมิแอนนีกัล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที ทั้งในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วย ความเข้ม 100 mW/cm^2	52

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย โดยสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือ สามารถแสดงผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photoelectric effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) สามารถแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนกับตัวนำ และสามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้โดยการเติมสิ่งเจือปนของธาตุที่เหมาะสมลงไป จากสมบัติเหล่านี้ ทำให้เราสามารถนำมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มากมาย เช่น ไดโอด (diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) วงจรรวม (integrated circuit) และ เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทันทีที่มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันทีและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (dc current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพียงแต่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงแดด ก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้โดยไม่สร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวทั้งยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี [1]

ฟิล์มบาง CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap) มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ ประมาณ 2.4 eV ดังนั้นถ้านำฟิล์มบาง CdS มาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะทำให้สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย [1-3] ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบาง CdS ให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

การเตรียมฟิล์มบาง CdS สามารถเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอริง , วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ , วิธีไอระเหยสารเคมี , วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส และวิธีการอาบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี

เป็นวิธีที่มีข้อดี คือ สามารถเตรียมสารได้ขนาดใหญ่ตามต้องการ ค่าใช้จ่ายในการเตรียมไม่สูงมาก และยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักคือที่ประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้ค่อนข้างง่ายกว่าวิธีอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการประดิษฐ์ เซลล์แสงอาทิตย์

การเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้นฟิล์มบาง CdS จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) กับซัลเฟอไรด์ไอออน (S^{2-}) ในสารละลาย แล้วไปเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ (substrate) จากนั้นนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มาทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar, S_2 , สูญญากาศ และในอากาศ โดยที่การแอนนัลจะทำให้การจัดเรียงตัวของอะตอมในฟิล์มบาง CdS เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ทำให้ฟิล์มบาง CdS มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และที่สำคัญจะทำให้คุณสมบัติเชิงฟิสิกส์เปลี่ยนไปโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง[2 – 8]

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี
2. เพื่อศึกษาการแอนนัลฟิล์มบาง CdS ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (x-rays diffraction)
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของแสงโดยวัดการส่งผ่านแสง (optical transmission) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มบาง CdS
6. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของอะตอมของสารเจือเช่น Cu , Mn และ Ag ที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบาง CdS

ขั้นตอนในการดำเนินงาน มีดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์โดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบาง CdS ที่มีคุณภาพดี มีความหนาสม่ำเสมอ และติดแน่นดีกับกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการแอนนีสฟิล์มบาง CdS ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar , S₂ , สูญญากาศ และในอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
5. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
6. ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการวัดการส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
7. ทำการศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า
8. ทำการวัดความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการพิเศษนี้ คือ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี
2. ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการในการแอนนีสฟิล์มบาง CdS
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของสารเจือที่มีต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS
4. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดีเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นบัฟเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

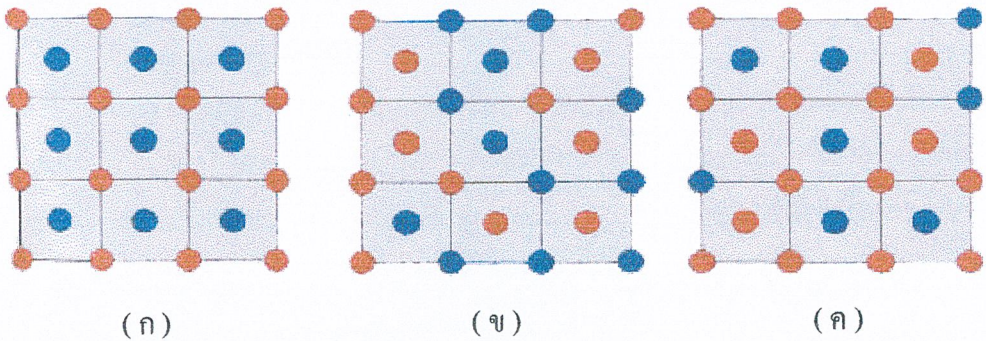
บทที่ 2

โครงสร้างผลึกและโครงสร้างแถบพลังงาน

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึก การมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น การนำไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น

2.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ [9,11]

โครงสร้างผลึก คือตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้น การจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ มีความเป็นระเบียบซ้ำซ้อนหรือเป็นแบบคาบ (periodic) ในระยะยาวอนันต์เรียกการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ว่า แบบออร์เดอร์ระยะยาว ดังรูป 2.1ก สารที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ ได้แก่ผลึกในอุดมคติ (ideal crystal) หรือผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal) และอัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$) ถ้ามีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกในระบบ 3 มิติ แบบเปิดตำแหน่งหรือแบบไม่เป็นคาบ เรียกการจัดเรียงตัวแบบนี้ว่าแบบดิสออร์เดอร์ (disordered) ดังรูป 2.1ข สารที่มีการจัดเรียงตัวแบบนี้ ได้แก่ อัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิ $> T_c$ และผลึกจริงหรือผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนถ้ามีการจัดเรียงตัวอะตอมภายในโครงสร้างผลึกแบบเป็นคาบในระยะสั้น เรียกการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบนี้ว่า แบบออร์เดอร์ระยะสั้น (short range ordered) ดังรูป 2.1ค สารที่มีการจัดเรียงตัวแบบนี้ ได้แก่ อัลลอยด์ที่มีอุณหภูมิ $< T_c$ โดยที่ T_c คืออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส



รูปที่ 2.1 แสดงชนิดของการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในระบบ 2 มิติ

ก. แบบออร์เคอร์หรือแบบออร์เคอร์ระยะยาว

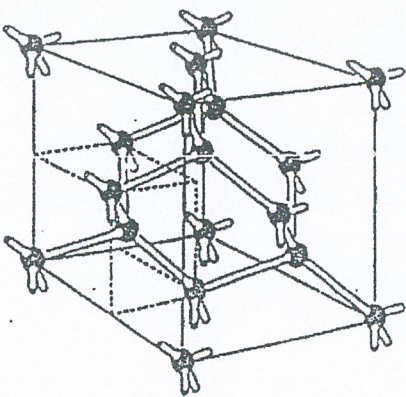
ข. แบบคิสออร์เคอร์

ค. แบบออร์เคอร์ระยะสั้น

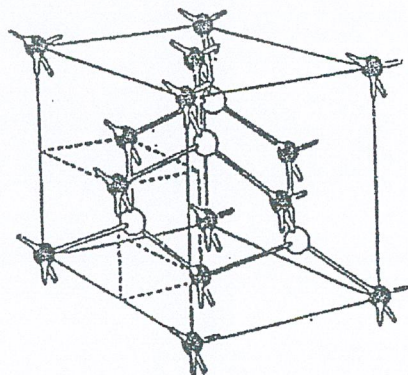
จากการศึกษาเราพบว่าโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะ โครงสร้างอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite)

2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [9-11]

โครงสร้างนี้จะมีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร ดังรูป 2.2 โดยมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน (tetrahedral bond) แต่มีโครงผลึกพื้นฐาน (basic lattice) ที่ $(0\ 0\ 0)$ และ $(\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4})$ เป็นอะตอมต่างชนิดกันดังนั้นโครงสร้างซิงค์เบลนด์ (zincblende) จึงเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเพชเชนเตอร์คิวบิกสองโครงสร้างมาซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $1/4$ ตามแนวเส้นทะแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอมซึ่งประกอบด้วย อะตอมของธาตุ 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่นถ้าอะตอมของ Zn อยู่ที่ $(0\ 0\ 0), (0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}), (\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0)$ ตำแหน่งของอะตอม S ก็จะอยู่ที่ $(\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}), (\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4})$ ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

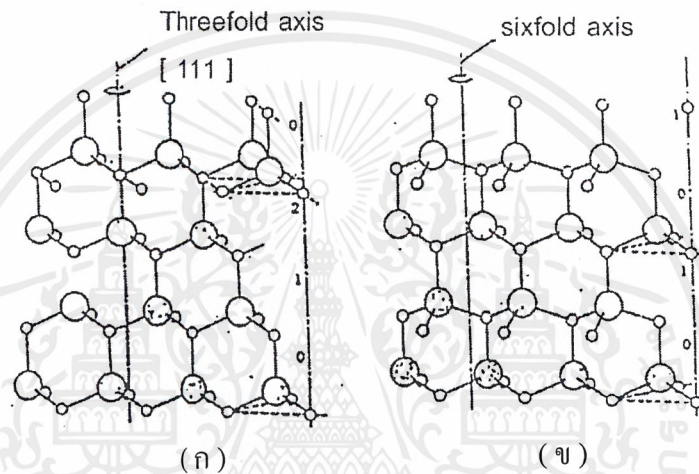


รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [9-10]

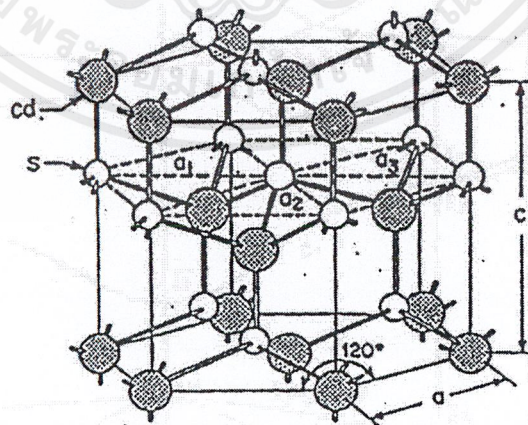
โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ นี้มีพันธะของอะตอมในโครงผลึกเหมือนกับโครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของระนาบของกลุ่มพันธะเตตระฮีดรอนของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไปดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกนี้เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกย่อยแบบเฮกซะโกนอลโคลส-แพค (hexagonal close-packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม



รูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอม

ก. แบบซิงค์เบลนด์

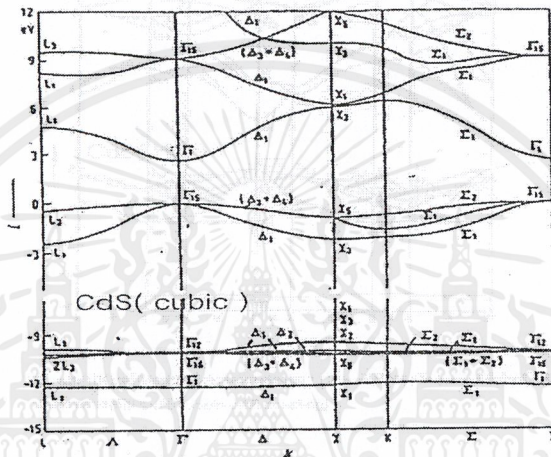
ข. แบบเวิร์ทไซท์



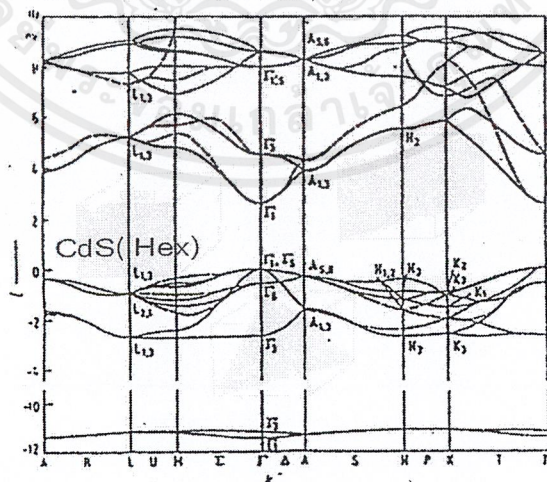
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [9,12]

ส่วนโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS นั้นเป็นแบบตรงคือ มีการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของทั้งซิงค์เบลนด์และเวิร์ตไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 โดยที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 และ 2.51 eV ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิง ระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin-orbit coupling)



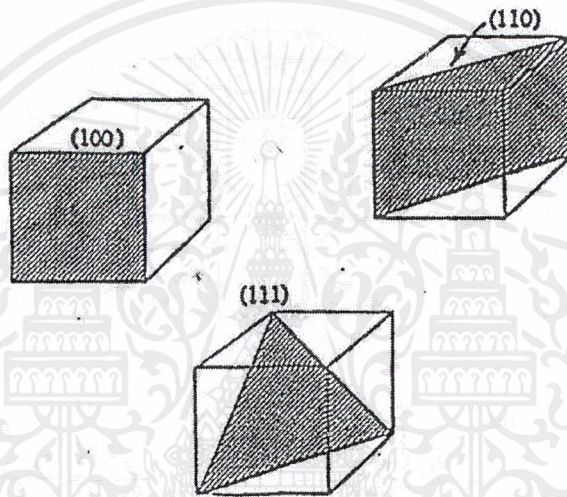
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต (spin-orbit coupling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ดัชนีมิลเลอร์ [9-10]

การบอกระนาบต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกนั้นจะบอกเป็นค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึกที่มีอัตราส่วนเท่ากัน ผู้เสนอทฤษฎีนี้คือ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยมีการแยกการพิจารณาดัชนีมิลเลอร์เป็น 2 ประเภทดังนี้คือ

2.3.1 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [9-10]



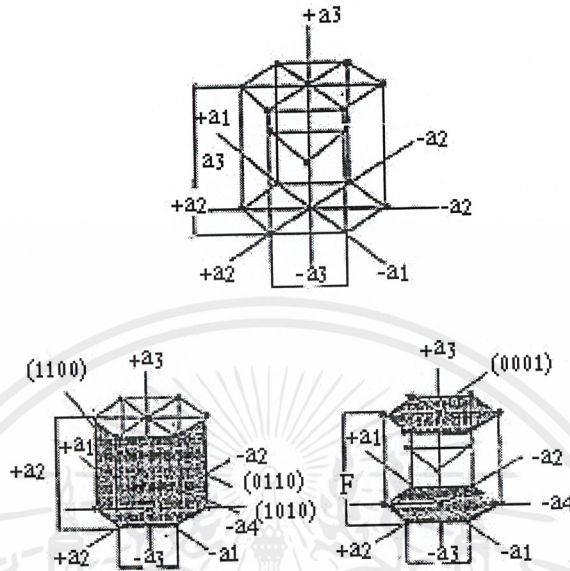
รูปที่ 2.8 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

การบอกระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะบอกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวน คือ h, k, l โดยใช้เครื่องหมาย (h, k, l)

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

เมื่อ p, q และ r คือจุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั่นคือ h, k, l จะเป็นตัวเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือ ดัชนีมิลเลอร์นั่นเอง

2.3.2 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โคโลสแพค [9-10]



รูปที่ 2.9 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลโคโลสแพค

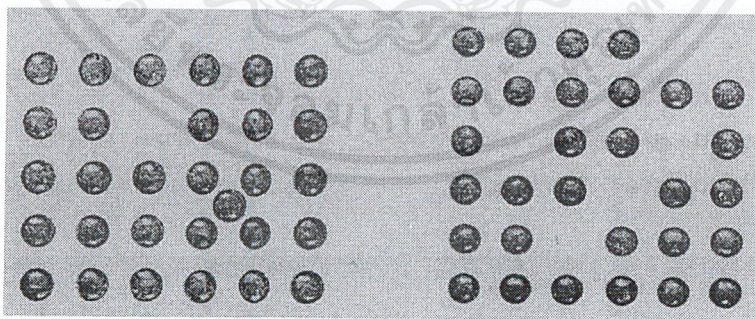
ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โคโลสแพค ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบ คือ ดัชนีมิลเลอร์ บราว ใช้สัญลักษณ์ h, k, i, l ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 และ c ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับ ดังรูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์หน่วยประกอบด้วยระนาบ 2 แกน คือ ระนาบฐานมี 2 ระนาบคือ ระนาบฐานบนและระนาบฐานล่าง แกน a_1, a_2, a_3 เป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐานทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัวแกน $a_1 = a_2 = a_3 = a$ และแกนที่ 4 คือแกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบทั้ง 2 ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนของระยะตัดแกนทั้ง 4 จะมีอัตราส่วนของจุดตัดแกนต่างๆ เป็น $(\frac{1}{\infty} \frac{1}{\infty} \frac{1}{\infty} \frac{1}{1})$ ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์บราว ก็คือ $(0\ 0\ 0\ 1)$ แต่เมื่อพิจารณาถึงความสมมาตรของรูปทรงปริซึมของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีแกน $a_1 = a_2 \neq a_3$ จึงนิยมใช้ดัชนีมิลเลอร์เพียง 3 ค่าคือ (hkl) ที่หาได้จากเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดของส่วนกลับของระยะระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 ที่มีอัตราส่วนเท่ากันตามลำดับเพื่อใช้สำหรับบอกชื่อระนาบต่างๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

2.4 โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคในผลึกจริง (real crystal) [9-10]

ผลึกจริงเป็นผลึกไม่สมบูรณ์หรือเป็นผลึกที่มีข้อบกพร่องของโครงผลึก(defect crystal) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆไปจากผลึกในอุดมคติ ข้อบกพร่องของผลึกมีหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) คือข้อบกพร่องผลึกแบบมีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบซัพสตีติวชันนัล (substitution defect) คือข้อบกพร่องผลึกแบบมีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial defect) คือข้อบกพร่องผลึกแบบการที่มีอะตอมไปแทรกอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึก อีกทั้งยังมีเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี เกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี [9-10]

ข้อบกพร่องแบบแวนแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุดซึ่งก็คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึกแบ่งเป็น 2 ชนิด คือข้อบกพร่องผลึกชนิดชอตตี้ (schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่บริเวณ ผิวหน้า (surface) ของโครงผลึก และข้อบกพร่องผลึกชนิดเฟรนเคิล (frenkel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอมหรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่าง ดังแสดงในรูป 2.10



(ก)

(ข)

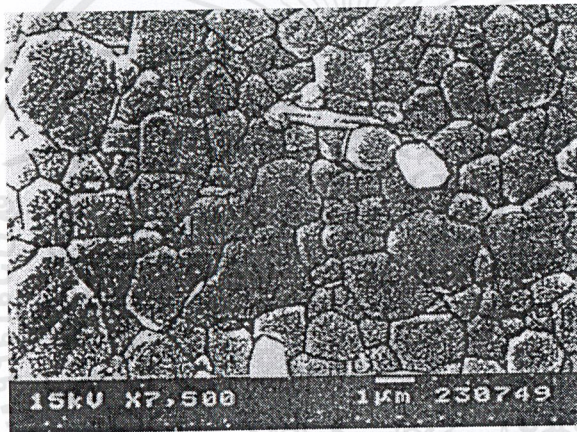
รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี

ก. ชนิดชอตตี้

ข. ชนิดเฟรนเคิล

2.4.2 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน [9-10]

เกรน คือบริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและแนวพรมแดนระหว่างเกรนต่างๆ ที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกัน เรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ผลึกที่มีเกรนเดียว (single grain) จะเรียกว่าผลึกเดี่ยว หรือผลึกเอกพันธ์ (single crystalline) ผลึกที่มีหลายเกรน เรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (poly crystalline) เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากกรณีผลึกในอุดมคติได้แก่ ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสกัดกั้นการไหลของกระแส หรือขอบเขตรอยต่อของเกรนมักจะทำให้ออกซิเจนหรือไฮโดรเจนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.11 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

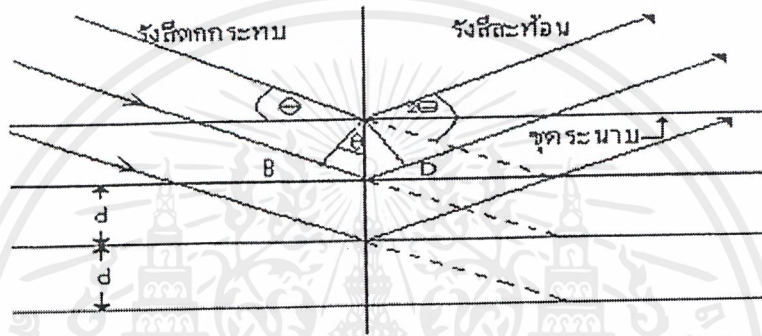
2.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [9-11]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้นระหว่าง $0.2-2 \text{ \AA}$ ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับหรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq a$ หรือความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (interatomic spacing) คือ ให้ $\lambda \approx 10^{-8} \text{ cm}$ หรือ $\lambda \approx 1 \text{ \AA}$ ตกกระทบผลึกที่ทำหน้าที่คล้ายเกรตติ้ง จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึก ซึ่งทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อแบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า “ กฎของแบรกก์ ” ดังสมการ

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

โดยที่ $\lambda(A^\circ) = \frac{12.4}{\epsilon (keV)}$ และ $\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

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



รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากรีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

2.5.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ [9-11]

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

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

เมื่อแทนสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \tag{2.4}$$

โดยที่ a = ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

2.5.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ [9-11]

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

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



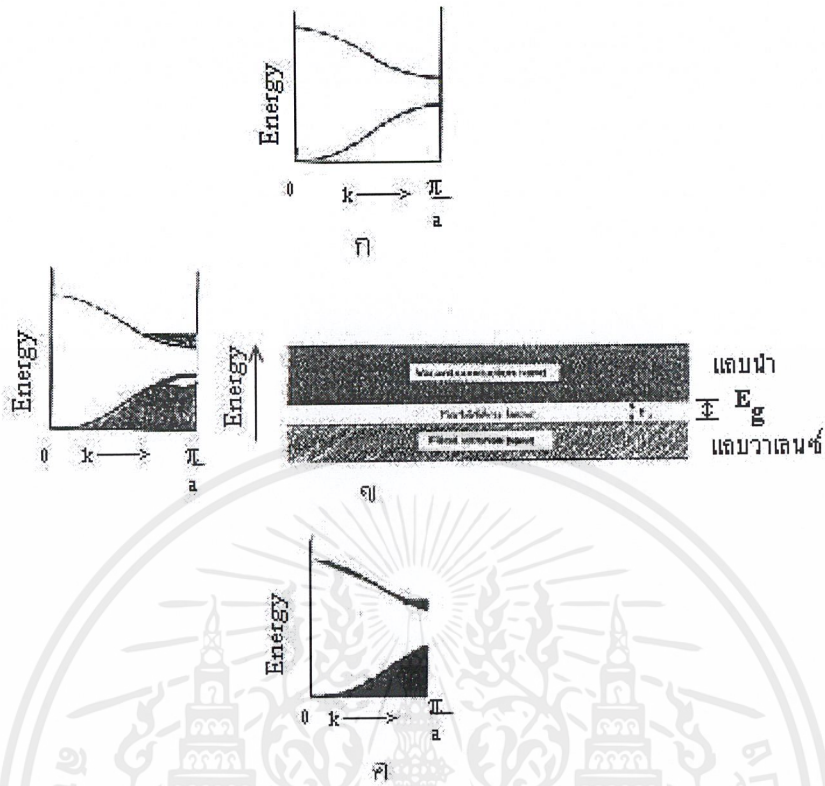
บทที่ 3

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน รวมถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ CdS

3.1 การเกิดสีของผลึก [9-10]

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดสารต่างๆที่เป็นอินทรินสิกว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังแสดงในรูป 3.1 จะประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ดึงดูดบียดเหนี่ยวเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อยและแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำมีอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยเรียกว่า “บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap)” ซึ่งเรียกขนาดของช่องว่างนั้นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g นำมาใช้แบ่งแยกชนิดของสารต่างๆ เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3$ eV สารกึ่งตัวนำ $E_g < 3$ eV และตัวนำไม่มี E_g เพราะมีแถบวาเลนซ์และแถบนำเหลื่อมกันอยู่



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆ

ที่เป็นอินทรีนสิก

ก. ฉนวน

ข. สารกึ่งตัวนำ

ค. ตัวนำ

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของสารตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากเมื่อฉายแสงที่มีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ($\hbar\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนจะไม่สามารถดูดกลืน (absorb) พลังงานโฟตอนเพื่อย้ายสถานะจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำหรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง พลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกจากผลึก จึงทำให้เรามองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนที่ถูกส่งผ่านออกมา เช่นผลึก CdS จะมีสีเหลืองเข้ม เนื่องจากมี $E_g = 2.42$ eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงิน หรือสีเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาทั้งหมดและเนื่องจากขนาดของ

ขอบเขตการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มิขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับย่านแสงสีเหลืองส้ม เราจึงมองเห็นผลึก Cds มีสีเหลืองส้ม

3.2 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [12-13]

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำจะทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานนั่นคือ การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ชั้นบนเปลี่ยนสถานะพลังงานไปอยู่แถบนำ ความพอดีของพลังงานแสงและช่องว่างแถบพลังงานต้องสมนัยกันหรือมากกว่าจึงเกิดการดูดกลืนขึ้น เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงจากการที่เปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนก็จะทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ การดูดกลืนแสงสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีค่าซิมซิปของแม่เหล็ก (μ) = 1 จะได้สมการคลื่นแสงเป็น

$$E = E_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \quad (3.1)$$

$$H = H_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] \quad (3.2)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0

H คือ สนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด H_0

$k = k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดย k_1 คือ เวกเตอร์จริงและ k_2 คือ เวกเตอร์จินตภาพ หรือ $k \cdot k = \mu \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \epsilon \omega^2 / c^2$

โดย ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

c คือ ค่าความเร็วแสง

ω คือ ค่าความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากอากาศเนื่องจากแสงจะได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางเป็นผลทำให้ความเร็วคลื่น, ความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - ik \quad (3.3)$$

n = ดัชนีหักเหจริง

k = สัมประสิทธิ์การสูญหาย

สำหรับคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|k_1| = n\omega / c \tag{3.4}$$

$$|k_2| = k\omega / c$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.1) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง x เป็นดังนี้

$$x = E \exp[i\omega(n\pi / c - t)] \exp(\omega kx / c) \tag{3.5}$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือ สนามไฟฟ้าสูงสุด

จากสมการที่ (3.5) แสดงถึงคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$I \propto EE^* \tag{3.6}$$

ดังนั้นจะได้

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

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

หรือ

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{3.7}$$

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

I = ความเข้มแสงที่ตำแหน่ง x

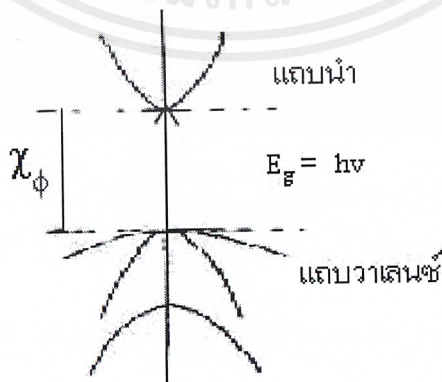
I_0 = ความเข้มแสงตกกระทบ (w/cm^2)

λ = ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

จากสมการที่ (3.7) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{I} \left(\frac{dI}{dx} \right) \tag{3.8}$$

สมการที่ (3.8) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง



รูปที่ 3.2 แสดงการย้ายสถานะพลังงานของพาหะเมื่อผลึก

มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ [9,12,13]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงาน การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปในแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบนำซึ่งเรียกการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะแบบตรง ดังรูปที่ 3.2 โดยสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์มีการเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้ และการเปลี่ยนสถานะแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองแบบ คือ การเปลี่ยนสถานะยินยอม (allowed transition) ชนิดต้องห้าม (forbidden transition) โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออฟติคอลเมตริกอิติเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ กล่าวคือถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้ามและถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ เราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะทั้งแบบยินยอมและแบบต้องห้ามได้ดังนี้ คือ

การเปลี่ยนสถานะชนิดยินยอม

$$(\alpha hf) = \frac{\partial ch}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^2 |H_{cf}(0)|^2 (hf - Eg)^{\frac{1}{2}} = A(hf - Eg)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

การเปลี่ยนสถานะชนิดต้องห้าม

$$(\alpha hf) = \frac{\partial ch}{n} \left(\frac{2\mu}{\hbar^2} \right)^2 |H_{cf}(0)|^2_{k=0} (hf - Eg)^{\frac{3}{2}} \equiv A'(hf - Eg)^{\frac{3}{2}} \quad (3.10)$$

โดยที่ μ คือ มวลลดทอน

H_{cv} คือ ออฟติคอลเมตริกอิติเมนต์ ระหว่างแถบนำและแถบวาเลนซ์

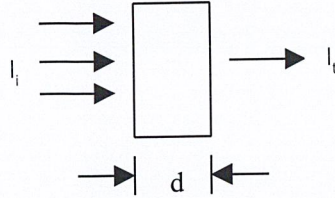
E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

hf คือ พลังงานโฟตอน

3.4 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [9,12,13]

สำหรับการทดลองของเราสามารถจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากกราฟการส่งผ่านของแสง (transmission) ผ่านสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ทะลุผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูป 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการผ่านแสงในสารตัวอย่าง
ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการนี้

$$T = I_t / I_i = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} / (1 + R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.11)$$

$$R = I_r / I_i = (n - 1)^2 + K^2 / (n + 1)^2 + K^2 \quad (3.12)$$

เมื่อ T = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

R = สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I_i = ความเข้มแสงที่ส่งผ่าน

I_r = ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

d = ความหนาของสารตัวอย่าง

I_t = ความเข้มแสงที่สะท้อน

N = ดัชนีหักเห

K = สัมประสิทธิ์การสูญเสียน (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนามากพอที่ทำให้ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มากดังนั้นสมการ (3.1) จะเขียนใหม่เป็น

$$T = I_t / I_i = (1 - R)^2 e^{-2\alpha d} \quad (3.13)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1 - R^2)$ มีค่าคงที่และสมการที่ (3.13) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \ln(I_i / I_t) \quad (3.14)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (3.14) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนจึงทำให้ได้ค่าของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α_0) ที่เกิดจากการบดพ่นออกมาจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้องซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำเท่านั้น

บทที่ 4

สมบัติทางไฟฟ้า

จากทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีโครงสร้างแถบพลังงานที่มีช่องว่างแถบพลังงานขนาดใหญ่เกินกว่า 2 eV โดยพลังงานที่อุณหภูมิต่ำไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน จะกลายเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

4.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล [9,10,12]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density: J) จาก $\mu = v_d / E$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (4.1)$$

เมื่อ μ_n และ μ_p คือสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า (electric resistivity : ρ) มีค่าเป็น $\sigma = 1 / \rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามักมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$\rho = 1 / q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4.2)$$

4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [9,14]

4.2.1 วิธีวัดโดยตรง (Direct Method) [9,14]

ใช้กับการวัดสารตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ทราบขนาดแน่นอน โดยวัดค่าความต้านทาน (R) แล้วจึงคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จาก

$$\rho = RA / l \quad (4.3)$$

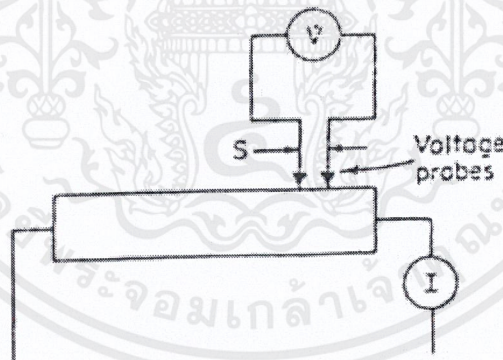
โดยที่ l = ความยาวของสารตัวอย่าง

A = พื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาความต้านทานของรอยต่อ (contact resistance) ระหว่างสารตัวนำกับความต้านทานที่ขั้วสัมผัสไว้ด้วย ซึ่งเราสามารถลดผลของความต้านทานที่รอยต่อได้โดยเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพต้านทานกับความต่างศักย์ไฟฟ้า จะพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะค่อยๆลดลง ในขณะที่ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะคงที่ นี่ก็คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แท้จริง

4.2.2 วิธีวัดด้วยปลายแหลมสองขั้ว (Two point probes Method) [9,14]

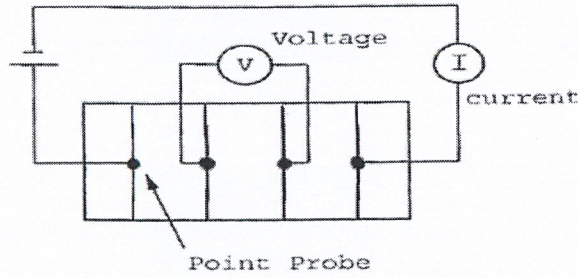
วิธีวัดนี้จะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งของสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่างๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อโลหะ (ที่ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อได้ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปและโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว

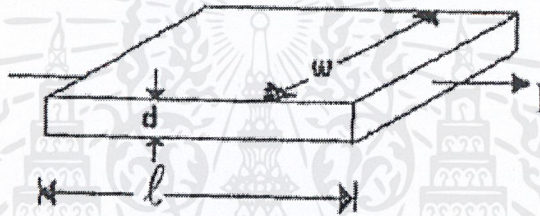
4.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (Linear Four – point probes Method) [9,14]

การวัดจะใช้ขั้วสัมผัสสี่ขั้วเรียงกันอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วสัมผัสคู่นอกส่วนคู่สัมผัสคู่ในวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น โดยขั้วไฟฟ้าจะเป็นโลหะแข็งโดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตมมีลักษณะเส้นเล็กแหลมวางเป็นแนวเส้นตรง จัดระยะห่างให้เท่ากันหมดดังแสดงให้เห็นเป็นดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นแบบสี่ขั้วเชิงเส้นของฟิล์มบาง

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูป จากกฎของโอห์มและใช้สมการ (4.2) จะคำนวณหาความต้านทานฟิล์มได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงขนาดของฟิล์มบางยาว l กว้าง w หนา d

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{wd} \tag{4.4}$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ($l = w$) ดังนั้นสมการ (4.4) เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \tag{4.5}$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

แต่ถ้า $l \neq w$ จะได้ว่า $R_s = R (w/l)$ (4.6)

เมื่อพิจารณาการวัดตามรูปที่ 4.1 เราจะหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการ

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \left[\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{(s_1 + s_3)} - \frac{1}{(s_2 + s_3)} \right] \tag{4.7}$$

โดยที่ s คือช่องว่างระหว่างขั้วในขณะที่ $s_1 = s_2 = s_3$ สมการ (4.7) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = 2\pi s V / I \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

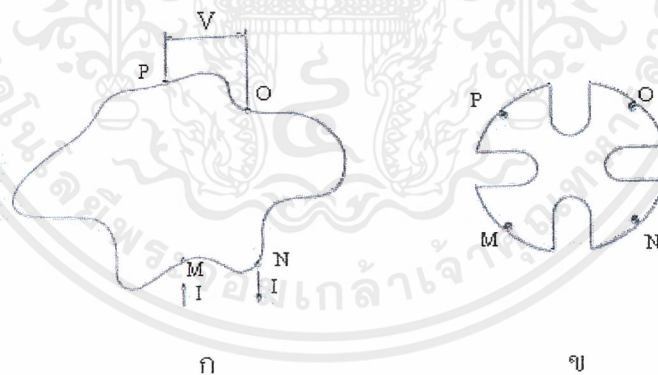
4.2.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีเวนเดอร์เพอร์ [9,14]

การวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า วิธีเวนเดอร์เพอร์เป็นวิธีการวัดที่วิธีหนึ่ง เพราะเป็นวิธีที่ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง รูปร่างของสารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ ขอเพียงแต่ให้สามารถติดขั้วไฟฟ้าได้ก็จะสามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวิธีนี้ก็คือสามารถวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าบนสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่าชนิด 4 ขั้วเชิงเส้นเพราะความกว้างของระยะขั้วไฟฟ้าสามารถปรับให้เล็กลงได้มากกว่า 4 ขั้วเชิงเส้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีเวนเดอร์เพอร์จะให้ค่าที่ถูกต้องโดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป ของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีเวนเดอร์เพอร์

ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

จากรูปที่ 4.4 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M และออกทางจุด N เราสามารถที่จะวัดความต่างศักย์ $V_{PO} = V_P - V_O$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_P - V_O}{I_{MN}} \quad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกทางจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (4.9) คือ

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \quad (4.10)$$

ทั้งสมการที่ (4.9) และ (4.10) จะปรากฏในรูปความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

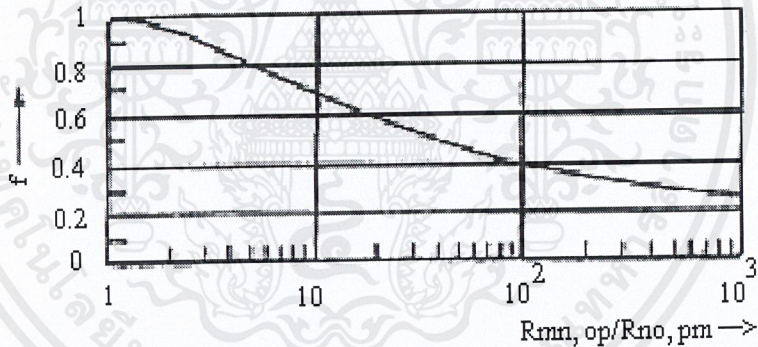
$$\exp\left[-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{MN,PO}\right] + \exp\left[-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{NO,PM}\right] = 1 \quad (4.11)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของขั้วสาร

ดังนั้น สมการที่ (4.11) สามารถเปลี่ยนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[\frac{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}}{2} \right] f \left[\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}} \right] \quad (4.12)$$

โดย f เป็นฟังก์ชันของ $(R_{mn,op} / R_{no,pm})$ เรียกว่าแฟกเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ดังนั้นสภาพค่าต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถหาได้จากสมการ (4.12)



รูปที่ 4.5 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเวนเดอร์เพาว์

จากวิธีวัดทั้งหมดนี้แฟกเตอร์ค่าแก้ที่สำคัญที่สุดที่จะเป็นเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง คือรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (non-blocking contact) เพื่อให้ได้รอยต่อดังกล่าวนี้จะต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมรวมทั้งชนิดและรูปร่างของ ขั้วสัมผัสด้วย

บทที่ 5

การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS

ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

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

5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [15]

ฟิล์มบาง CdS เกิดจากเกลือของแคลเดียมในสารละลาย NH_3 โดยเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



จาก (5.1) เกลือ CdSO_4 แยกตัวให้ Cd^{2+} จากนั้น Cd^{2+} จะรวมตัวกับ NH_3 กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนที่เรียกว่าแคลเดียมเตตระแอมมีน (cadmium tetraammine complex ion; $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{2+}$) จากนั้นจะแยกตัวให้ Cd^{2+} แล้วรวมตัวกับ S^{2-} ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของไทโอยูเรีย ถ้าผลคูณของความหนาแน่นของ Cd^{2+} กับ S^{2-} เกินกว่าค่าผลของความสามารถในการละลาย (solubility product; K_{sp}) ของ CdS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.1×10^{-28} ก็จะปรากฏคอลลอยด์ของ CdS ขึ้นในสารละลาย

โดยปกติ NH_3 จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของ Cd^{2+} ดังนั้นจึงนิยมใช้ NH_3 ที่มีความเข้มข้นมากเพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของ Cd^{2+} และ S^{2-} มีค่าเกินผลของความสามารถในการละลายของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2×10^{-14} เพราะจะทำให้เกิดเป็นคอลลอยด์ของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ แทนที่จะเป็น CdS ดังสมการ (5.4)



การเกิดฟิล์มบาง CdS ประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ

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



ซึ่งปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้และความเข้มข้นของ NH_3 ประมาณ 0.8-2.5 โมลาร์

2. การจับไทโอยูเรียเอาไว้โดยทำให้เกิดองค์ประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร



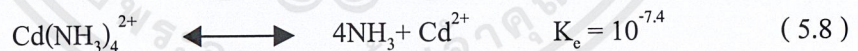
3. การเกิด CdS และการเกิดที่อยู่ใหม่โดยการแตกตัวขององค์ประกอบเชิงซ้อน



การเกิดฟิล์มบาง CdS ในสมการ (5.1) ถึง (5.3) เรียกว่า การตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogenous precipitation) หรือการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน (cluster by cluster) ส่วนสมการ (5.5) ถึง (5.7) เรียกว่า การตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogenous precipitation) หรือการตกผลึกแบบไอออนต่อไอออน (ion by ion)

5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ [16]

เนื่องจากความสามารถในการละลายของ CdS มีค่าต่ำมาก ดังนั้นการควบคุมการตกผลึกสามารถทำได้โดยการควบคุม Cd^{2+} กล่าวคือ ต้องเลือกตัวแทนคอมเพล็กซ์ (complexing agent) ซึ่งในที่นี้จะใช้ NH_3 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของ Cd^{2+} โดยการให้ NH_3 รวมตัวกับ Cd^{2+} กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนดังสมการ (5.1) ถึง (5.8) ซึ่งไอออนเชิงซ้อนจะแตกตัวให้ไอออนอิสระดังสมการ



เมื่อพิจารณาค่าของ K_{sp} และค่าคงที่สมดุล K_c จะเห็นว่า CdS สามารถตกผลึกได้ง่าย

โดยทั่วไปการเกิดฟิล์มบาง CdS มักเกิดการตกผลึกทั้งแบบโฮโมจีเนียสและแบบเฮเทอโรจีเนียส ซึ่งแบบโฮโมจีเนียสมักจะเกิดขึ้นมากในช่วงท้ายของการเกิดฟิล์มบาง มีผลทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพลดลง กล่าวคือ โปร่งแสงน้อยลง และมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวด้านนอกหลุดร่อนได้ง่าย

บทที่ 6

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

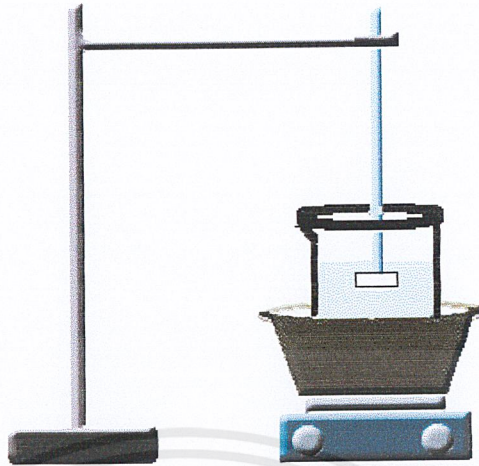
ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยวิธีการออบสารละลายเคมี พร้อมทั้งทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางในกรณีที่ไม่มีการแอนนีกัล กรณีที่มีการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar , S₂ , สูญญากาศ และในอากาศ รวมถึงกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เข้าไปในฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ โดยสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่ทำการศึกษาได้แก่ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) และศึกษาการส่งผ่านแสง (transmittance) เพื่อศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของฟิล์มบางและเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe)

6.1 วิธีการทดลอง

6.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ [9]

อุปกรณ์หลัก คือ แท่นยึดแผ่นรองรับทำจากเทฟลอน (teflon) ซึ่งเจาะร่องไว้ 8 ร่องและเจาะรูตรงกลางสำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้งและใส่แท่งแก้วตันเพื่อใช้เป็นแกนยึด โดยแท่งแก้วตันถูกยึดอยู่กับขาตั้งและจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) และน้ำปอลอดประจุอยู่ 100 มิลลิลิตร (ml) โดยที่บีกเกอร์ตั้งอยู่ในอ่างน้ำ (bath) และอยู่บนเครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วในการกวนสารละลายได้ ดังรูปที่ 6.1 ปรับอุณหภูมิให้คงที่ประมาณ 80 °C และปรับความเร็วในการกวนสารละลายประมาณ 60 รอบ/นาที นอกจากนี้ยังใช้เครื่องอัลตราโซนิกมาช่วยในการกำจัดตะกอนที่ไม่ต้องการซึ่งติดอยู่บนฟิล์มบางที่เตรียมได้บนแผ่นรองรับ โดยที่ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์แสดงดังตารางที่ 6.1 สารตั้งต้นต่างๆจะถูกเทลงในบีกเกอร์ที่เติมน้ำปอลอดประจุจนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมดเป็น 150 ml โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ และ $\text{NH}_3(25\%)$ เท่ากับ 0.01 M, 0.05 M และ 1.5 M ตามลำดับ และกำหนดให้ความเข้มข้นของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{C}_3\text{H}_2\text{AgO}_2$ เป็น 1% ของความเข้มข้นของ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ นั่นคือ 0.0001 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS

ตารางที่ 6.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการ
อาบสารละลายเคมีในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 ml

สารตั้งต้น	ปริมาณ
$\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$	0.38456 กรัม
$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$	0.57062 กรัม
NH_3 (25%)	16.83 ml
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.00255 กรัม
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$,	0.00296 กรัม
$\text{C}_3\text{H}_2\text{AgO}_2$	0.00250 กรัม

6.1.2 การเตรียมแผ่นรองรับ [9]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 12 และ 25 mm ซึ่งทำความสะอาดเป็นอย่างดี ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ
2. จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (trichloethylene ; TCE) เพื่อขจัดคราบไขมัน , อะซิโตน (acetone) เพื่อขจัด TCE , เอทานอล (ethanol) เพื่อขจัดอะซิโตน และน้ำปลอดประจุ ตามลำดับ

- นำกระจกสไลด์จากข้อ 2. ไปแช่ในสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กับน้ำปอลดประจุปริมาตร 10 ml และ 100 ml ตามลำดับ เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอลดประจูกอีกครั้ง
- จากนั้นนำกระจกสไลด์ไปใส่ในน้ำปอลดประจุและทำการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิค 3 รอบ รอบละ 10 นาที
- นำกระจกสไลด์ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที ก็จะได้กระจกสไลด์ที่สะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

6.1.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS [9,15-17]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีประกอบไปด้วย $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ และ NH_3 (25%) จำนวน 0.01 , 0.05 และ 1.5 M ตามลำดับ โดยสารทั้งหมดจะถูกเทลงในขวดรูปชมพู่และเติมน้ำปอลดประจุนมีปริมาตรเป็น 50 ml ในการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag จะใช้ปริมาณสารตั้งต้นเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS เพียงแต่จะเพิ่มสาร $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{C}_3\text{H}_2\text{AgO}_2$ ตามลำดับ จำนวน 0.0001 M โดยมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมมีดังต่อไปนี้

- เสียบกระจกสไลด์เข้ากับแท่นยึดที่ทำจากเพฟลอน แล้วนำไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีแท่งแม่เหล็กและน้ำปอลดประจูละ 100 ml ซึ่งบีกเกอร์ตั้งอยู่ในอ่างน้ำบนเครื่องกวนสารละลายที่ปรับอุณหภูมิเท่ากับ 80 °C และปรับความเร็วในการกวนสารละลายเท่ากับ 60 รอบ/นาที
- ซั่งสารตั้งต้นซึ่งประกอบไปด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต ($\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$) , ไทโอยูเรีย ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) , และแอมโมเนีย NH_3 (25%) ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 6.1
- เมื่ออ่างน้ำมีอุณหภูมิประมาณ 80 °C จึงละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟต , ไทโอยูเรียและแอมโมเนียเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเติมน้ำปอลดประจุนมีปริมาตรเป็น 50 ml
- เทสารละลายจากข้อ 3. ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการวัดค่า pH ของสารละลาย ซึ่งมีค่าประมาณ 11.8 และสังเกตสีที่เปลี่ยนไปของสารละลาย ปล่อยให้ทิ้งไว้ 60 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่
- หลังจากผ่านไป 60 นาที จึงนำแท่นยึดกระจกสไลด์ออกจากสารละลาย ซึ่งจะเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนกระจกสไลด์และปรากฏอนุภาคของ CdS ที่จับกันเป็นก้อนเล็กๆคล้ายผงฝุ่นเกาะอยู่ที่ผิวหน้าฟิล์มบาง

6. นำแท่นยึดกระจกสไลด์ไปจุ่มลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอลดประจุอยู่ประมาณ 200 ml ซึ่งตั้งอยู่ในเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อทำการเขย่าให้ผงฝุ่นที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าออก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการเปลี่ยนน้ำปอลดประจุและเขย่าซ้ำจนผงฝุ่นที่เกาะอยู่หลุดออกจนหมด
7. นำฟิล์มบางที่ได้มาทำการเคลือบซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 6 จนครบ 3 ครั้ง จากนั้นนำไปให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ และเก็บในถุงที่ปิดผนึกอย่างดี เพื่อนำไปใช้งานขั้นต่อไป
8. เตรียมฟิล์มบางจากข้อ 1 ถึง 7 ประมาณ 150 ชิ้น เพื่อนำไปใช้วัดคุณสมบัติต่างๆที่เงื่อนไขต่างๆ
9. สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 7 เพียงแต่ในการเจือด้วย Cu , Mn และ Ag จะเพิ่มสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_3\text{H}_2\text{AgO}_2$ ปริมาณดังตารางที่ 6.1 ตามลำดับลงในข้อ 2
10. เตรียมฟิล์มบาง CdS ในข้อ 9 ประมาณ 100 ชิ้นเพื่อนำไปใช้วัดคุณสมบัติต่างๆที่เงื่อนไขต่างๆ
11. นำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มาทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , สูญญากาศและในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที สำหรับฟิล์มบางที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ นำมาแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที
12. นำฟิล์มบาง CdS ที่ผ่านการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที มาทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์คิฟแฟรกโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Brucker D8 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน $\text{CuK}\alpha$ มีค่าเท่ากับ 1.5418 Å ความต่างศักย์ 30-40 kV และกระแสไฟฟ้า 25-40 mA
13. นำฟิล์มบาง CdS ที่ผ่านการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที มาทำการศึกษาคูสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยูวี / วิสลิเบิล 6405 ยี่ห้อ เจนเวย์ (UV / visible 6405 spectrophotometers) และเครื่องยูวี-วิสลิเบิล ดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-900 nm เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
14. นำฟิล์มบาง CdS ที่ผ่านการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที มาทำการวัดสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น ซึ่งใช้กระแส 1-6 μA ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนประเภท ELH 300 W ความเข้มแสง 95000 lux และไม่มีการฉายแสงเพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. นำฟิล์มบาง CdS ที่ผ่านการแอนนีกัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20 ที่มีการเคลือบ 1-3 ครั้ง มาทำการวัดความหนาด้วยเครื่อง surface profiler ยี่ห้อ Dektak³st โดยใช้ แรง (force) 10 ถึง 30 mg

6.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง CdS พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากสีของสารละลายในบีกเกอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีหลังจากเติมแอมโมเนียลงไป ในบีกเกอร์ที่มีสารละลายของเกลือแคดเมียมซัลเฟต ไทโอยูเรีย และน้ำปอดประจุ โดยสารละลายจะปรากฏสีขาวขุ่นแล้วเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อนและเป็นสีเหลืองเข้มอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาประมาณ 60 วินาที และหลังจากจุ่มครบตามกำหนดแล้ว เมื่อนำฟิล์มบางขึ้นมาจากสารละลาย สังเกตพบว่ามีอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์บางส่วนที่จับตัวเป็นก้อนคล้ายฝุ่นผงเกาะอยู่ที่ผิวฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์เป็นจำนวนมากเกือบทั่วแผ่น แต่หลังจากเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแล้วเป่าให้แห้งจะสังเกตพบว่ามีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน สม่ำเสมอ มีสีเหลืองส้ม เป็นมันวาว และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์พบว่าเนื้อฟิล์มบางเคลือบติดสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) ดังรูปที่ 6.2



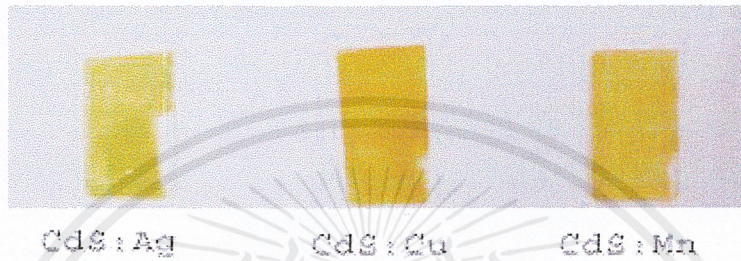
CdS

รูปที่ 6.2 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้
และยังไม่ผ่านการแอนนีกัล

6.2.2 ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag พบว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้ากว่าฟิล์มบาง CdS เล็กน้อย ซึ่งสีของสารละลายที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ที่ใช้ $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ และ $C_3H_3AgO_2$ ผสมในสารละลาย พบว่ามีสีขาวขุ่นแล้วเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาล , มีสีขาวขุ่นแล้วเปลี่ยนเป็นสีส้มน้ำตาล และสีขาวขุ่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

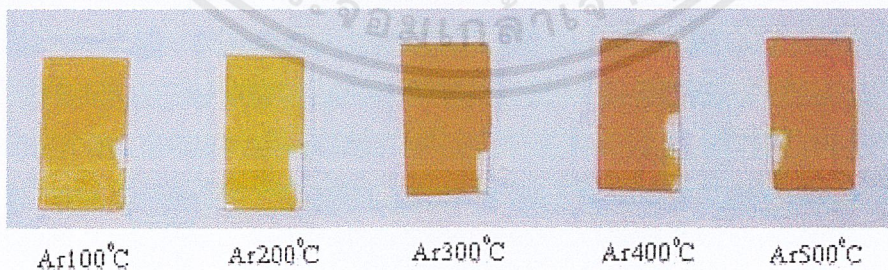
แล้วเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ตามลำดับ โดยลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบติดบนกระจกสไลด์จะมี ตะกอนติดอยู่ เมื่อนำไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกแล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ สังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบางที่ได้จะมีลักษณะผิวหน้าไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกันสะท้อนแสงเป็นบางส่วน มีสีเหลืองส้มอ่อนกว่าฟิล์มบาง CdS นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็น ชนิดเอ็น (n-type) โดยลักษณะของฟิล์มเป็นดังรูปที่ 6.3



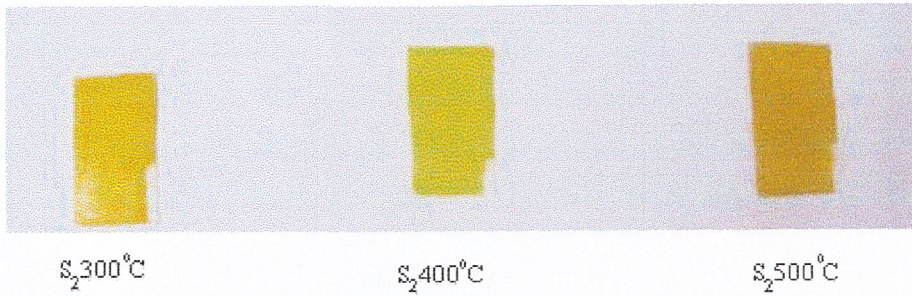
รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ที่เตรียม ได้เมื่อยังไม่ผ่านการแอนนัล

6.2.3 ฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

รูปที่ 6.4 ถึง 6.7 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar , S₂ , สูญญากาศและในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที และรูปที่ 6.8 ถึง 6.10 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เมื่อแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.4 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



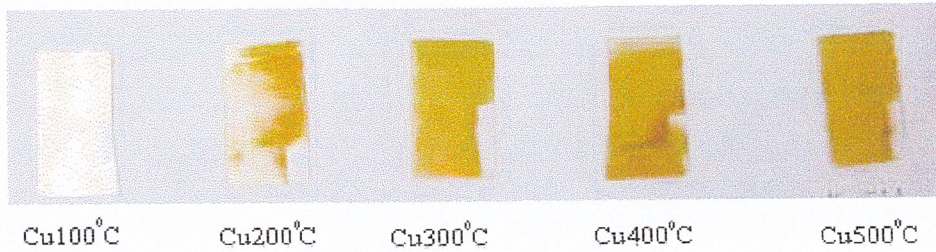
รูปที่ 6.5 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.6 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีกภายใต้สุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.7 แสดงฟิล์มบาง CdS เมื่อแอนนีกในอากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.8 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu เมื่อที่แอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.9 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn เมื่อที่แอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.10 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag เมื่อที่แอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

6.2.4 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [9,18,19]

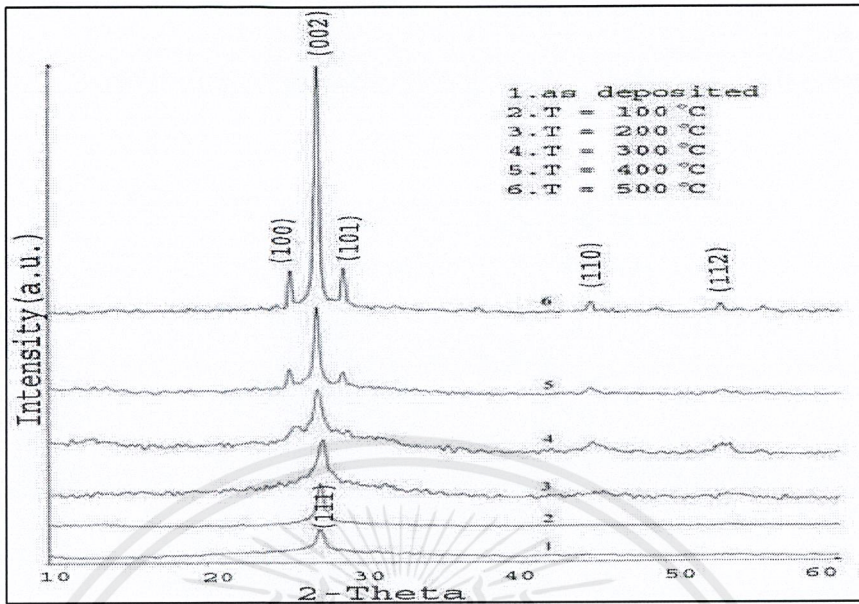
เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษารังสีเอ็กซ์เพื่อดูลักษณะของพิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐาน เพื่อดูว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด พิจารณารูปที่ 6.11 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีกและมีการแอนนีกภายใต้บรรยากาศของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

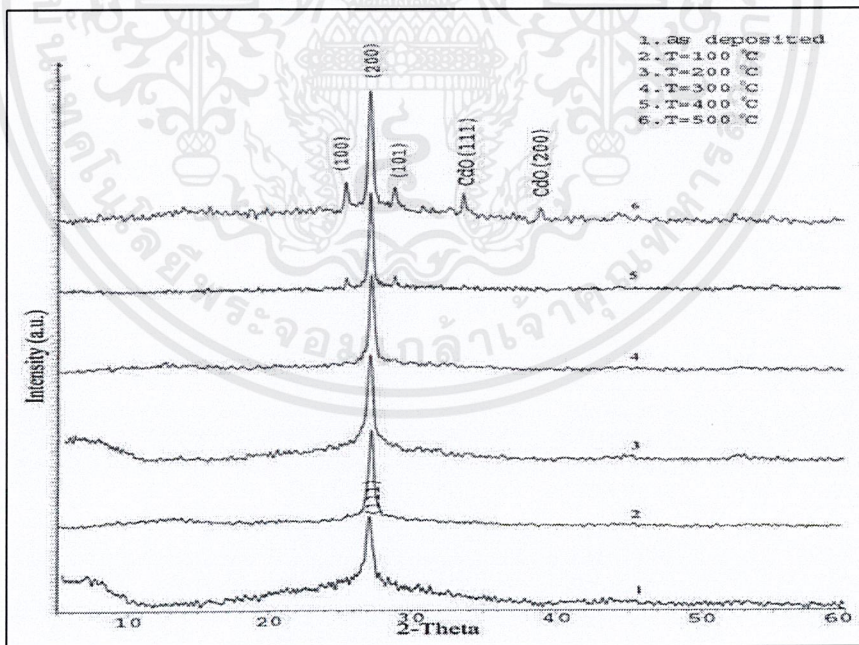
ก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งให้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์และสูญญากาศ พบว่าเมื่อยังไม่มีการแอนนัลฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก ซึ่งส่วนใหญ่จัดเรียงตัวในลักษณะที่ทิศของระนาบ (111) ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ แต่อาจจะมีเฟสของเฮกซะโกนอลอยู่บ้างแต่เชื่อว่ามึปริมาณน้อย ดังนั้นจึงแสดงว่ากระบวนการการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) จะเด่นกว่ากระบวนการการตกผลึกแบบเฮเทโรจีเนียส (heterogeneous) เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 400 °C พบว่าโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลงโดยสังเกตได้จากพีคที่ปรากฏมี 4 พีคซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากระนาบ(100), (101), (110) และ (112) โดยมีค่าคงที่โครงสร้างผลึก $a = 4.142 \text{ \AA}$, $c = 6.724 \text{ \AA}$

รูปที่ 6.12 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยไม่มีการแอนนัลจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก นอกจากนี้ยังมีพีคของระนาบ (111) และ (200) ที่แสดงให้เห็นว่าเป็นลักษณะโครงสร้างของ CdO ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิแอนนัลประมาณ 400 °C โครงสร้างผลึกจะมีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล [9,18,19]

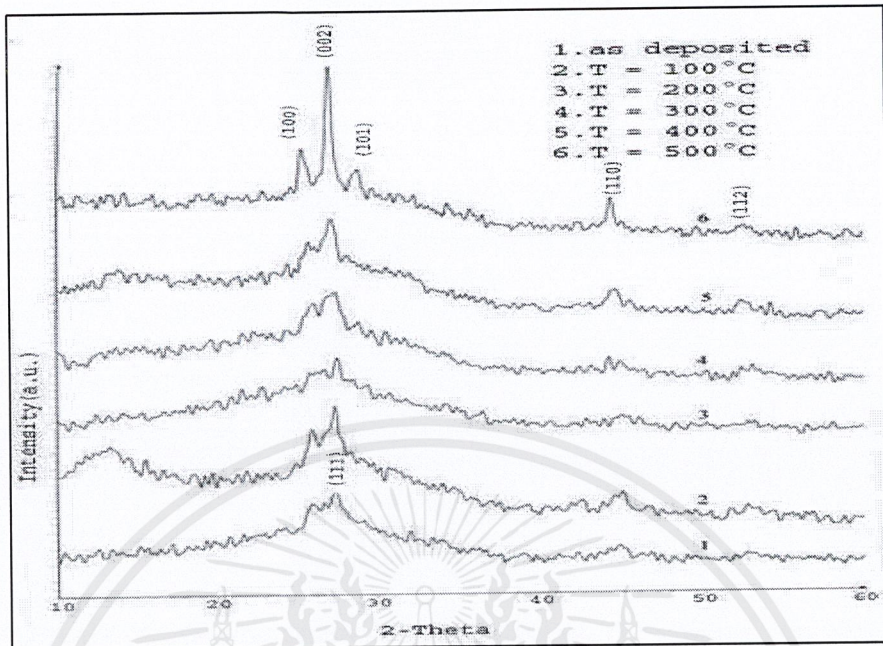
รูปที่ 6.13 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งให้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu และ Mn พบว่าลักษณะความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ลดลงอย่างมากและพีคจะแผ่กว้างออกมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นอะมอร์ฟัสของฟิล์มบางและการที่โครงสร้างผลึกมีการผิดรูปไป (deformation) เนื่องจากอะตอมของ Ag อาจเข้าไปแทรกในบริเวณที่เป็นที่ว่างหรืออาจเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของ Cd ได้ โดยมีค่าคงที่โครงสร้างผลึก $a = 4.136 \text{ \AA}$, $c = 6.713 \text{ \AA}$



รูปที่ 6.11 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.12 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีกัลและมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศเป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.13 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของ Ag ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สามารถนำไปคำนวณหาค่าขนาดของเกรน (crystal size) ได้จากสมการที่ (6.1)

$$d = \frac{\lambda}{D \cos \theta} \quad (6.1)$$

เมื่อ d = ขนาดของเกรน

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

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

θ = มุมที่พีคของสเปกตรัม

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบาง CdS ที่แอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, สูญญากาศ, และในอากาศ เมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 30 nm เป็น 45 nm ที่ 500 °C ยกเว้นกรณีที่แอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์เมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 120 nm เป็น 150 nm ส่วนกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของ Cu, Mn และ Ag ขนาดของเกรนมีค่าลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 30, 9 และ 7 nm ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิแอนนิลเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน [9,19]

เมื่อทำการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่มีความหนาประมาณ 400 nm ในกรณีที่ไม่มีการแอนนีกัล , กรณีที่มีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , สูญญากาศ และในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที รวมถึงกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เข้าไปในฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยูวี / วิสลิเบล 6405 และเครื่องยูวี-วิสลิเบล ดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-900 nm พบว่า ฟิล์มบาง CdS ที่ยังไม่ผ่านการแอนนีกัล จะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ แต่เมื่อแอนนีกัลฟิล์มบาง CdS ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งให้ผลทำนองเดียวกันกับการแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ และสูญญากาศ พบว่าฟิล์มบางจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 510 nm ผ่านได้ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge) จะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400 °C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนกลับไปทางด้านความยาวคลื่นที่ลดลง ดังรูปที่ 6.14

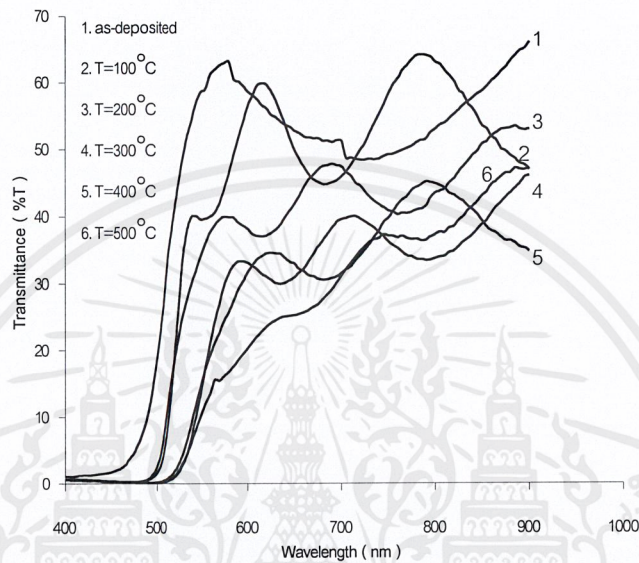
กรณีที่แอนนีกัลฟิล์มบาง CdS ในอากาศ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบางจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 510 nm ผ่านได้ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.15

สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu และยังไม่ผ่านการแอนนีกัล จะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ แต่เมื่อแอนนีกัลฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบางจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงที่อุณหภูมิ 400 °C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าลดลงและที่อุณหภูมิ 500 °C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6.16

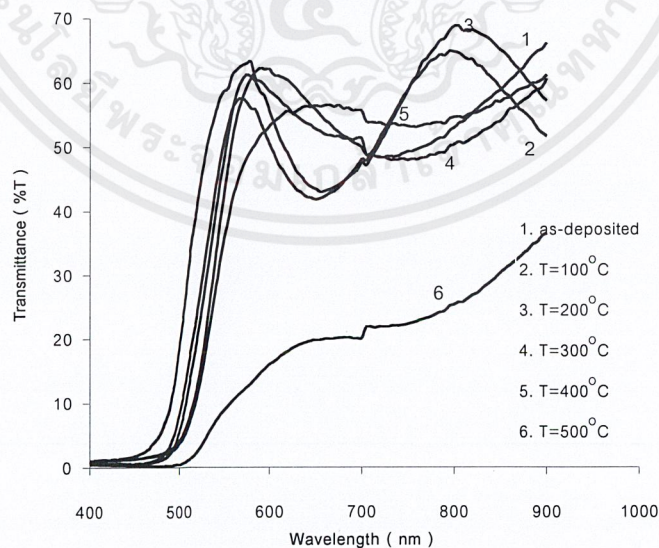
ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ซึ่งให้ผลการทดลองเหมือนกับการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag เมื่อยังไม่ผ่านการแอนนีกัล จะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ แต่เมื่อแอนนีกัลฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบางจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านได้ และพบว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลเท่ากับ 100 °C และเมื่ออุณหภูมิแอนนีกัลเท่ากับ 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$^{\circ}\text{C}$ ขอบการดูดกลืน พื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าลดลง ในทำนองเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิแอนนیلเท่ากับ 300°C และ 400°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นจนที่อุณหภูมิแอนนیلเท่ากับ 500°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่มีค่าลดลง ดังรูปที่ 6.17

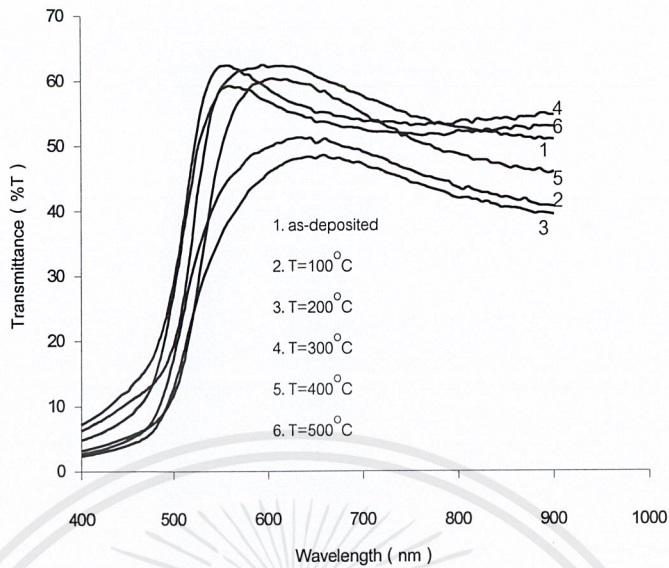


รูปที่ 6.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีกรแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที

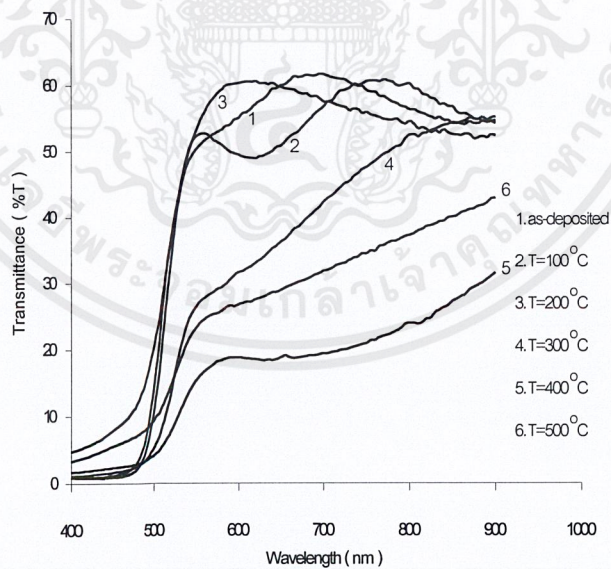


รูปที่ 6.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีกรแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $100-500^{\circ}\text{C}$ ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที



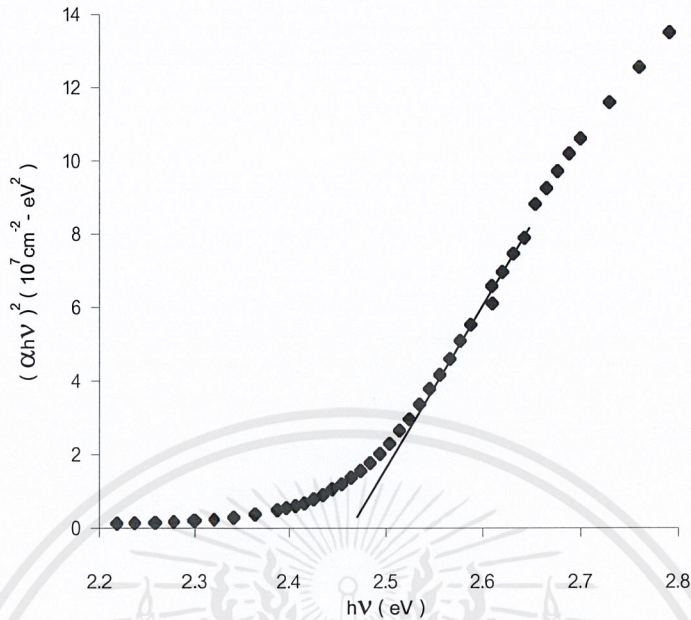
รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-900 nm ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

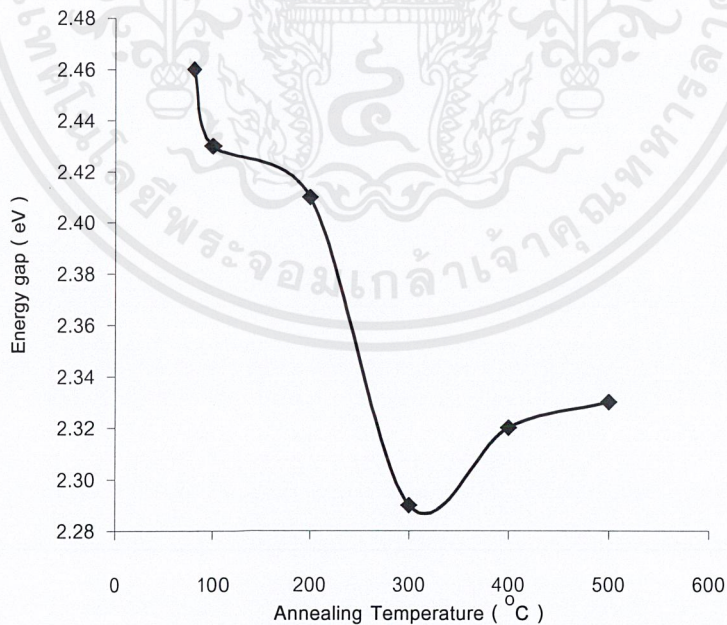
จากนั้นนำข้อมูลการส่งผ่านแสงที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงตามสมการที่ (6.2)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{100}{T}\right) \quad (6.2)$$

แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคูณพลังงานโฟตอน $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ทั้งหมดจะแสดงลักษณะกราฟเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นการแสดงว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่เท่ากับหรือมากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จึงมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแบบไม่มีกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นการแสดงว่าฟิล์มบาง CdS ทั้งหมดที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างพลังงานเป็นแบบตรง และสามารถหาขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงานได้จากการลากเส้นตรงต่อส่วนที่แสดงกราฟแบบเชิงเส้นไปตัดแกนพลังงานโฟตอน โดยจุดตัดกราฟที่ได้ก็คือ ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยว และพบว่า ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนिलเพิ่มขึ้นและจะมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนिलประมาณ 300°C จากนั้นขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนिलเพิ่มขึ้นจาก 300°C เป็น 500°C ส่วนในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn และ Ag ลงในฟิล์มบาง CdS จะพบว่าขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนिलเพิ่มขึ้นและจะมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิประมาณ 400°C แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 500°C ขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 6.18 ถึง 6.20 และในตารางที่ 6.2 ถึง 6.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้ [9,18,19]

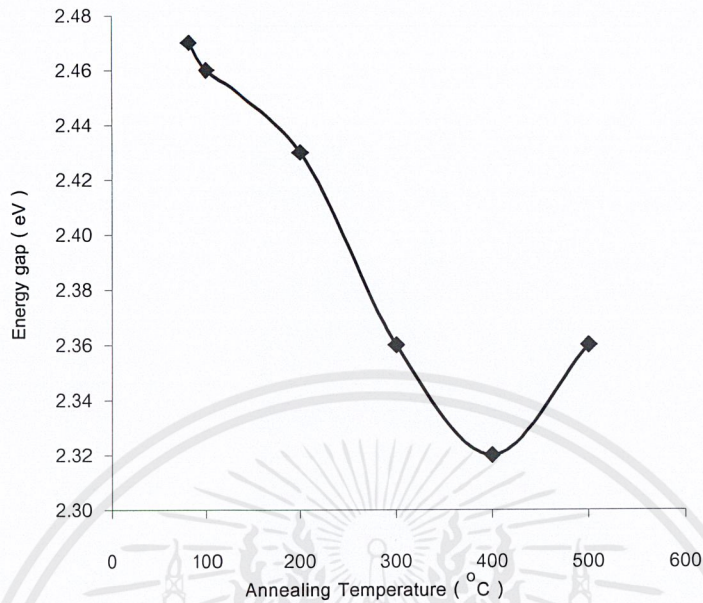


รูปที่ 6.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง CdS เมื่อไม่มีการแอนนีกัล



รูปที่ 6.19 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนีกัล เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนัล เมื่อแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์ม บาง CdS เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที

บรรยากาศ อุณหภูมิ (°C)	อาร์กอน	สุญญากาศ	อากาศ	ซัลเฟอร์
	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)
as-deposited	2.46	2.46	2.46	2.46
100	2.43	2.42	2.44	-
200	2.41	2.42	2.42	-
300	2.29	2.32	2.31	2.40
400	2.32	2.33	2.32	2.35
500	2.33	2.34	2.33	2.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์ม บาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

ชนิดอะตอม ของสารเจือ อุณหภูมิ (°C)	คอปเปอร์	แมงกานีส	ซิลเวอร์
	E_g (eV)	E_g (eV)	E_g (eV)
as-deposited	2.42	2.44	2.47
100	2.39	2.43	2.46
200	2.36	2.36	2.43
300	2.37	2.32	2.36
400	2.32	2.23	2.32
500	2.34	2.24	2.36

เมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเคลือบ 1-3 ครั้ง และฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ที่มีการเคลือบ 3 ครั้ง พบว่าความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 แสดงความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเคลือบ 1-3 ครั้ง และความหนาของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ที่มีการเคลือบ 3 ครั้ง

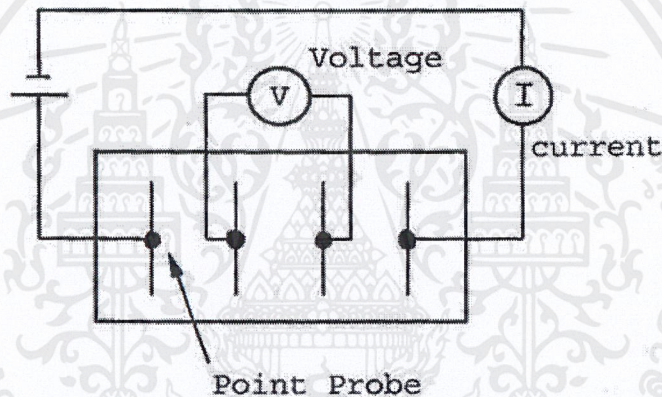
สารตัวอย่าง	ความหนา (nm)
CdS 1 ครั้ง	155
CdS 2 ครั้ง	270
CdS 3 ครั้ง	400
CdS:Cu	70
CdS:Mn	320
CdS:Ag	1500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 วิธีการทดลองและผลการทดลองวัดค่าความต้านทาน

6.3.1 อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แหล่งจ่ายไฟ
3. อิเล็กโตรมิเตอร์
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอด ELH
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 6.21 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

6.3.2 วิธีการทดลอง

1. นำฟิล์มบาง CdS ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar, S₂, สูญญากาศ และในอากาศ และฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที นำมาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินนำไฟฟ้าเต็มบนผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยแบ่งระยะห่างระหว่างจุดที่เต็มให้เท่ากันจำนวน 4 จุด
2. ต่อวงจรดังรูป 6.21
3. จ่ายกระแสให้กับวงจรแล้ววัดค่าแรงดันที่ได้โดยทำการวัดทั้งหมดประมาณ 10 ค่า ซึ่งกระแสที่จ่ายให้ควรมีค่าน้อย
4. ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 3 แต่สลับขั้วแหล่งจ่ายกระแส (reverse bias)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำซ้ำข้อ 3 และ 4 แต่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของฟิล์มบาง CdS ที่แอนนิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีแสงและมีการฉายแสงพบว่าเมื่อมีการแอนนิตที่อุณหภูมิ $200\text{-}300^\circ\text{C}$ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้ปริมาณขอบเขตของเกรนลดลงจึงทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงจนที่อุณหภูมิประมาณ 200°C ความต้านทานแผ่นจะมีค่าต่ำที่สุด และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการบดพร่องของผลึกมากกว่าข้อบกพร่องที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน ซึ่งให้ผลการทดลองทำนองเดียวกันกับกรณีที่แอนนิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ , สูญญากาศ และในอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 6.5 ถึง 6.8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้รายงานไว้[2,20]

ส่วน ฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เมื่อแอนนิตที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่มากขึ้นแต่ปริมาณขอบเขตของเกรนลดลง กระแสจึงไหลได้มากขึ้นทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในการจับพันธะทำให้เกิดข้อบกพร่องทางผลึกส่งผลให้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 6.9 ถึง 6.11 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้รายงานไว้[20,21]

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนิต ขณะที่ไม่มีแสงและขณะมีการฉายแสง เมื่อแอนนิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ $100\text{-}500^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนิต ($^\circ\text{C}$)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1.0×10^5	11.9×10^5	11.9
100	2.8×10^5	15.8×10^5	5.6
200	0.4×10^5	1.1×10^5	2.8
300	29×10^5	45.3×10^5	1.6
400	32.9×10^5	34.4×10^5	1.0
500	31.1×10^5	39.8×10^5	1.3

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีส ขณะ
ไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซ
ซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีส (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1.0×10^5	11.9×10^5	11.9
100	-	-	-
200	-	-	-
300	5.2×10^6	5.5×10^6	1.1
400	4.1×10^6	4.8×10^6	1.2
500	4.0×10^6	4.3×10^6	1.1

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีส ขณะ
ไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีสในสุญญากาศ ที่
อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีส (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1.0×10^5	11.9×10^5	11.9
100	1.9×10^5	19.3×10^5	10.2
200	0.9×10^5	3.9×10^5	4.3
300	3.6×10^5	11.2×10^5	3.1
400	4.3×10^5	12×10^5	2.8
500	15.5×10^5	26.6×10^5	1.7

ตารางที่ 6.8 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะ
ไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีสลในอากาศ ที่อุณหภูมิ
100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1×10^5	11.9×10^5	11.9
100	2.5×10^5	25.3×10^5	10.1
200	0.7×10^5	1.8×10^5	2.6
300	5.7×10^5	13×10^5	2.3
400	1.4×10^5	10.5×10^5	7.5
500	2.5×10^5	2.7×10^5	1.1

ตารางที่ 6.9 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu
ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อ
แอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C
เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	2.7×10^6	2.8×10^6	1.0
100	8.9×10^6	9.9×10^6	1.1
200	5.5×10^6	5.6×10^6	1.0
300	1.9×10^6	4.7×10^6	2.5
400	2.0×10^6	2.4×10^6	1.2
500	4.3×10^6	4.3×10^6	1.0

ตารางที่ 6.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	6.0×10^6	6.8×10^6	1.1
100	0.9×10^6	3.6×10^6	4.0
200	0.8×10^6	2.5×10^6	3.1
300	1.8×10^6	4.7×10^6	2.6
400	3.1×10^6	3.7×10^6	1.2
500	3.3×10^6	4.8×10^6	1.5

ตารางที่ 6.11 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสล ขณะไม่มีการฉายแสงและขณะมีการฉายแสงเมื่อแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100-500 °C เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนีสล (°C)	R_s (ฉายแสง) (Ω/\square)	R_s (ไม่ฉายแสง) (Ω/\square)	การตอบสนองต่อแสง
80	1.8×10^6	2.4×10^6	1.3
100	2.1×10^6	3.4×10^6	1.6
200	2.0×10^6	5.9×10^6	3.0
300	0.6×10^6	1.2×10^6	2.0
400	1.8×10^6	3.8×10^6	2.1
500	1.1×10^6	4.2×10^6	3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.5) เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดได้ดังตารางที่ 6.12 ถึง 6.14 พบว่าเมื่อแอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที จะได้ฟิล์มบางที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 200 °C สำหรับฟิล์มบางที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag เมื่อแอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มบางที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด

ตารางที่ 6.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่ สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีก (T) เมื่อแอนนีกภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar และ S₂ เป็นเวลา 20 นาที

พารามิเตอร์	Ar		S ₂	
	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
T (°C)	200	200	500	500
ρ_{\min} ($\Omega.cm$)	1.6	4.4	160	172
E_g (eV)	2.42	2.42	2.38	2.38

ตารางที่ 6.13 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่ สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีก (T) เมื่อแอนนีกในสุญญากาศและอากาศ เป็นเวลา 20 นาที

พารามิเตอร์	สุญญากาศ		อากาศ	
	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
T (°C)	200	200	200	200
ρ_{\min} ($\Omega.cm$)	3.6	15.6	2.8	7.2
E_g (eV)	2.41	2.41	2.31	2.31

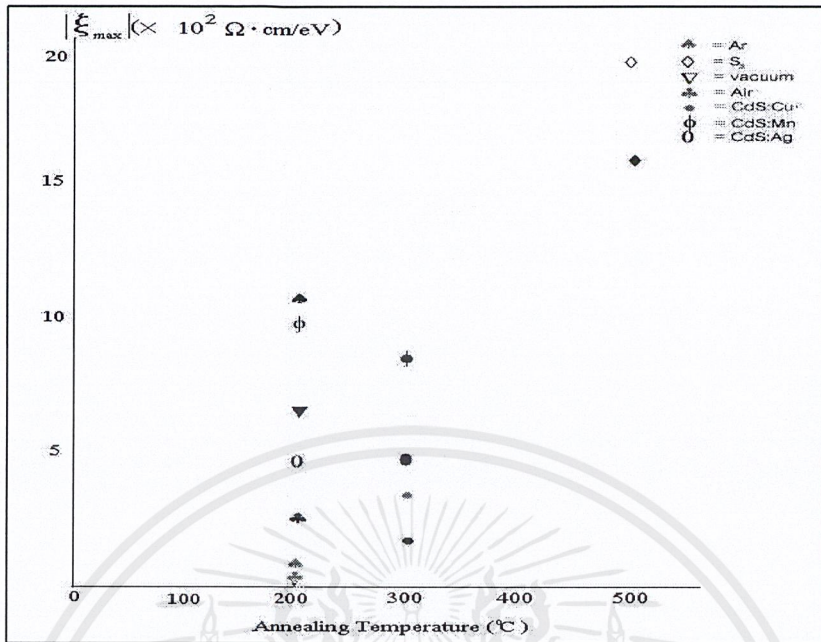
ตารางที่ 6.14 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่า E_g ของฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิแอนนีกัล (T) เมื่อแอนนีกัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

พารามิเตอร์	ชนิดสารเจือ					
	Cu		Mn		Ag	
	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
T (°C)	300	400	200	200	300	300
ρ_{\min} ($\Omega \cdot \text{cm}$)	76	96	32	100	24	48
E_g (eV)	2.32	2.32	2.23	2.23	2.36	2.36

เมื่อทราบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแล้วนั้น เราสามารถที่จะนำไปคำนวณหาค่าดัชนีเชิงคุณภาพค่ามากที่สุด (ξ_{\max}) ได้จากสมการที่ (6.3) ซึ่งดัชนีเชิงคุณภาพค่ามากที่สุดสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยที่เมื่อ ξ_{\max} มีค่ามากก็ จะทำให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย โดยแสดงในรูปที่ 6.22 และในตารางที่ 6.15

$$\xi = \frac{\Delta\rho}{\Delta E_g} = \frac{\rho(80^\circ\text{C}) - \rho_{\min}(\text{TTA})}{E_g(80^\circ\text{C}) - E_g(\text{TTA})} \quad (6.3)$$

- เมื่อ $\rho(80^\circ\text{C})$ = สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเมื่อไม่มีการแอนนีกัล
 $\rho_{\min}(\text{TTA})$ = สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดของฟิล์มบางเมื่อมีการแอนนีกัล
 $E_g(80^\circ\text{C})$ = ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเมื่อไม่มีการแอนนีกัล
 $E_g(\text{TTA})$ = ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเมื่อมีการแอนนีกัลที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด



รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเชิงควมค่ามากที่สุดกับอุณหภูมิแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซต่างๆเป็นเวลา 20 นาทีทั้งในกรณีไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงด้วย ความเข้ม 100 mW/cm^3

ตารางที่ 6.15 แสดงค่า ξ_{max} ของฟิล์มบาง CdS ที่แอนนัลภายใต้บรรยากาศต่างๆ เป็นเวลา 20 นาที

บรรยากาศแอนนัล	สารเจือ	T (°C)	ξ_{max} ($\Omega \cdot \text{cm} / \text{eV}$)	
			ฉายแสง	ไม่ฉายแสง
Ar	-	200	60	1080
S ₂	-	500	-1950	-1555
สุญญากาศ	-	200	8	640
อากาศ	-	200	8	269
N ₂	Cu	300	320	160
	Mn	200	990	819
	Ag	300	436	436

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษ เป็นการเตรียมฟิล์มบาง CdS ทั้งในกรณีที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ และกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag โดยวิธีการอบสารละลายเคมี ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้คือ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ และ $\text{NH}_3(25\%)$ จำนวน 0.01 M, 0.05 M และ 1.5 M ตามลำดับ และกำหนดให้ความเข้มข้นของ $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_3\text{H}_2\text{AgO}_2$ และ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็น 1% ของความเข้มข้นของ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ นั่นคือ 0.0001 M สารทั้งหมดถูกนำมาทำปฏิกิริยาในบีกเกอร์ ขนาด 200 ml ซึ่งมีน้ำปอดประจุอยู่ 100 ml แล้วเท $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ซึ่งละลายใน $\text{NH}_3(25\%)$ แล้วเติมน้ำปอดประจุตามลงไปจนมีปริมาตรเป็น 150 ml ควบคุมอุณหภูมิและอัตราเร็วในการกวนสารละลายให้คงที่ประมาณ 80°C และ 60 รอบ/นาที ตามลำดับ ใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางประมาณ 60 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ตามเงื่อนไขต่างๆมาทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซ Ar , S_2 , N_2 , สูญญากาศ และในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที โดยฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ และยังไม่ผ่านการแอนนิล จะมีสีเหลืองส้ม โปร่งแสง มีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอ ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag จะมีสีเหลือง โปร่งแสง มีผิวหน้าที่เรียบน้อยกว่า เมื่อไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ

เมื่อทำการแอนนิลที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สีของฟิล์มบางเข้มขึ้น โดยจะสังเกตได้ชัดเจนกับฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 300°C ขึ้นไป และเมื่อทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าอะตอมของซัลเฟอร์ที่ผิวหน้าฟิล์มบางจะหลุดมาเกาะที่ปลายหลอดของเตาแอนนิล[9] ส่วนในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้นพบว่า ในช่วงแรกปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสังเกตได้จากสีของสารละลายที่เปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นและสีเหลืองอ่อนจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มอย่างรวดเร็ว ในขั้นตอนสุดท้ายพบว่าเกิดตะกอนสีส้มลอยอยู่ที่ผิวหน้าของสารละลายและเคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งคาดว่าเป็น คอลลอยด์ของ CdS [9,22] ส่วนในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu , Mn และ Ag ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆในช่วงแรกโดยจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองน้ำตาล , สีส้มน้ำตาลและสีน้ำตาล นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดเอ็น

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อไม่มีการแอนนิลมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก แต่เมื่อเอ็กซเรย์เป็นเอ็กซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอนนิตฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงขึ้นพีการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (111) จะเข้มข้น จนที่อุณหภูมิ 400 °C พีการเลี้ยวเบนที่ระนาบต่างๆจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มบาง CdS มีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกไปเป็นเฮกซะโกนอลที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C แต่สำหรับฟิล์มบางที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุต่าง Cu , Mn และ Ag ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะมีความเข้มของพีคลดลงและแผ่กว้างออก แสดงให้เห็นถึงความเป็นอะมอร์ฟัสของฟิล์มบาง เนื่องจากอะตอมของสารเจืออาจเข้าไปแทรกในบริเวณที่ว่างหรือเข้าไปแทนที่อะตอมของ Cd ก็ได้

เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแอนนิต ขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปอาจเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- ก. โครงสร้างผลึกแตกต่างกันย่อมมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกัน
- ข. อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบดิสออร์เดอร์ ทำให้เกิดส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail)
- ค. ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) หรือขนาดของเกรน

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนิตให้สูงขึ้นผลของขนาดควอนตัมมีผลมาก กล่าวคือ ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ยังไม่ได้แอนนิต ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากที่สุด เนื่องจากฟิล์มบางมีเกรนขนาดเล็กมากจนกระทั่งผลของขนาดควอนตัมแสดงออกมาให้เห็น (ส่วนผลในข้อ ก. และข้อ ข. ดูเหมือนจะไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้) สำหรับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกไปเป็นเฮกซะโกนอลหรือเปลี่ยนจากดิสออร์เดอร์ไปเป็นออร์เดอร์จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C อะตอมจะจัดเรียงตัวอย่างเหมาะสม ทำให้สามารถลดปัญหาจากส่วนหางของแถบพลังงานลงได้ ซึ่งก็คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นแม้ว่าผลต่างของค่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างแบบคิวบิกกับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลยังไม่ทราบค่าแน่ชัด [19]

ความต้านทานแผ่นวัดโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิแอนนิตเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนิตประมาณ 200 °C จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานไว้ [20,21] ส่วนในกรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ,Mn แล Ag เมื่ออุณหภูมิแอนนิตเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C ค่าความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นอาจจะขึ้นกับปัจจัยอย่างน้อย 4 ประการ โดยประการแรกคือแวกเนจของอะตอมซัลเฟอร์ (V_s) ประการที่สองคือ อะตอมมีการจัดเรียงตัวแบบดิสออร์เดอร์ ประการที่สามคือ สัดส่วนทางเคมี และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประการที่สี่คือ ผลของควอนตัมหรือขนาดของเกรน ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนیلเพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนขอบเขตของเกรนลดลง อิเล็กตรอนหรือโฮลจึงไหลได้สะดวกยิ่งขึ้น ส่วนอะตอมที่อยู่ผิดตำแหน่งจะมีจำนวนลดลงทำให้ส่วนหางของแถบพลังงานลดลง ซึ่งการลดลงของอะตอมที่อยู่ผิดตำแหน่งกับการเพิ่มขึ้นของแวนเดอวาล์วจะส่งผลให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นอยู่กับผลของขนาดของเกรน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นกับอิทธิพลของสัดส่วนทางเคมีของ CdS เป็นสิ่งสำคัญ โดยสัดส่วนทางเคมีของ Cd กับ S จะเข้าใกล้ 1 ต่อ 1 จึงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางยังขึ้นกับอิทธิพลของอะตอมออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณขอบของเกรนจนเกิดเป็นสารประกอบตัวอื่นๆเช่น CdSO_4 , CdO , CuO และ CuSO_4 [21] ซึ่งสารประกอบออกไซด์เหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นจึงส่งผลให้ความต้านทานแผ่นเพิ่มขึ้นด้วย และการที่โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอาจก่อให้เกิดกับดักพลังงานปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน นอกจากนี้อะตอมของออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณขอบของเกรนยังประพฤติตัวเป็นทั้งกับดักพาหะอิสระ หรือเป็นศูนย์กลางแห่งการรวมตัวของพาหะได้อีกด้วย ส่วนอะตอม Cu, Mn และ Ag ที่เข้าไปอยู่ในโครงผลึกของ CdS จะประพฤติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน

กล่าวโดยสรุปได้ว่าการเจืออะตอมของธาตุ Cu, Mn และ Ag ลงในฟิล์มบาง CdS จะส่งผลให้ฟิล์มบางมีความต้านทานเพิ่มขึ้นและสามารถตอบสนองต่อแสงได้ดีขึ้นเนื่องจากอะตอมของ Cu, Mn และ Ag ทำหน้าที่เป็นกับดักอิเล็กตรอน ดังนั้นเมื่อมีการฉายแสงแล้วอิเล็กตรอนจะเป็นอิสระส่งผลให้ฟิล์มบางสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอบสารละลายเคมี พบเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- คุณภาพของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับวิธีการกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เจือจาง ดังนั้นในการกัดผิวหน้าจึงควรระวังไม่ให้กระจกสไลด์ช้อนทับกัน เพราะจะทำให้กระจกสไลด์ถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
- ขณะทำการเคลือบฟิล์มบาง ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไม่ควรเติมน้ำปอดประจุเพื่อปรับปริมาณ เพราะจะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด

- ควรมีการศึกษาอัตราเร็วการเคลือบและความหนาของฟิล์มบางในการเคลือบแต่ละครั้งว่าความหนาเพิ่มขึ้นอย่างไร
- เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางเรียบร้อยแล้วควรนำไปศึกษาคุณสมบัติอย่างรวดเร็วหรือไม่ก็ก่อนที่จะนำไปศึกษาคุณสมบัติควรเก็บฟิล์มบางไว้อย่างมีทิศทางเพราะอาจทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-19

Radiation = 1.540598

Cd S

2th	I	h	k	l
-----	---	---	---	---

Cadmium Sulfide

26.547	100	1	1	1
30.743	22	2	0	0
44.040	47	2	2	0
52.163	33	3	1	1
54.671	5	2	2	2
64.043	6	4	0	0
70.594	10	3	3	1
72.715	4	4	2	0
80.993	10	4	2	2
87.059	5	5	1	1

Lattice : Face-centered cubic

Mol. weight = 144.47

S.G. : F-43m (216)

Volume [CD] = 196.22

a = 5.81100

Dx = 4.890

Z = 4

I/lor = 14.06

Pattern : 75-1545

Radiation = 1.540598

Cd S

2th	I	h	k	l
-----	---	---	---	---

Cadmium Sulfide

24.801	63	1	0	0
26.490	44	0	0	2
28.173	100	1	0	1
36.604	25	1	0	2
43.671	43	1	1	0
47.814	41	1	0	3
50.870	6	2	0	0
51.805	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
69.243	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

Lattice : Hexagonal

Mol. weight = 144.47

S.G. : P63mc (186)

Volume [CD] = 99.90

a = 4.14200

Dx = 4.803

c = 6.72400

Z = 2

I/lor = 7.99

Pattern : 1-1049

Radiation = 1.540600

Cd O

2th	I	h	k	l
-----	---	---	---	---

Cadmium Oxide

33.153	100	1	1	1
38.439	100	2	0	0
55.660	100	2	2	0
63.229	75	3	1	1
69.583	30	2	2	2
82.352	15	4	0	0
90.998	30	3	3	1
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

Lattice : Face-centered cubic

Mol. weight = 128.41

S.G. : Fm3m (225)

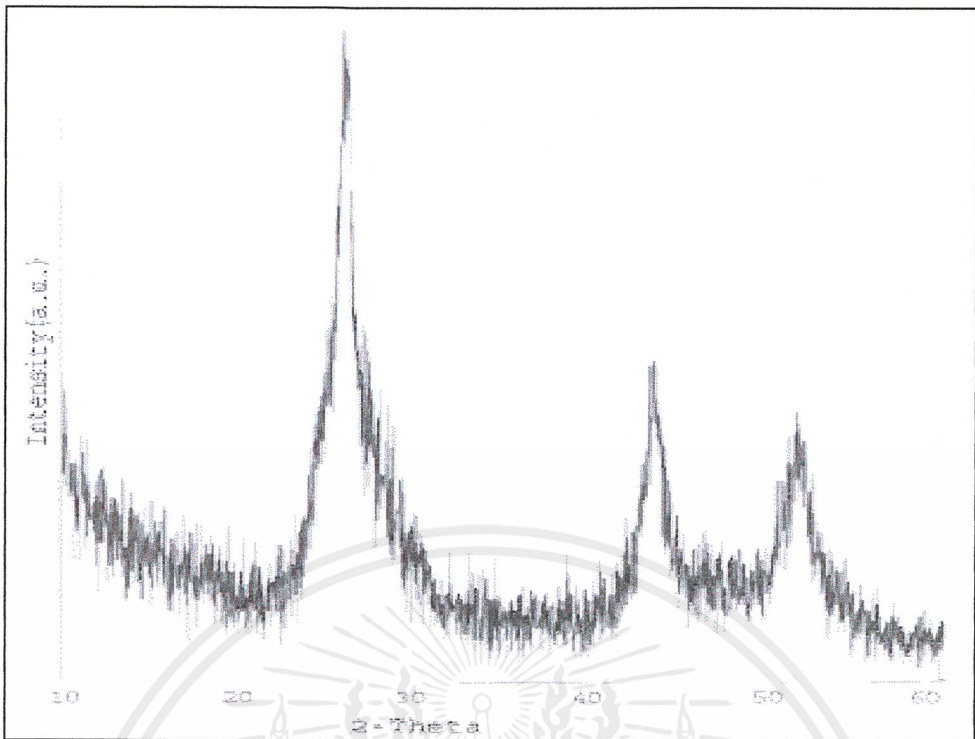
Volume [CD] = 103.10

a = 4.68900

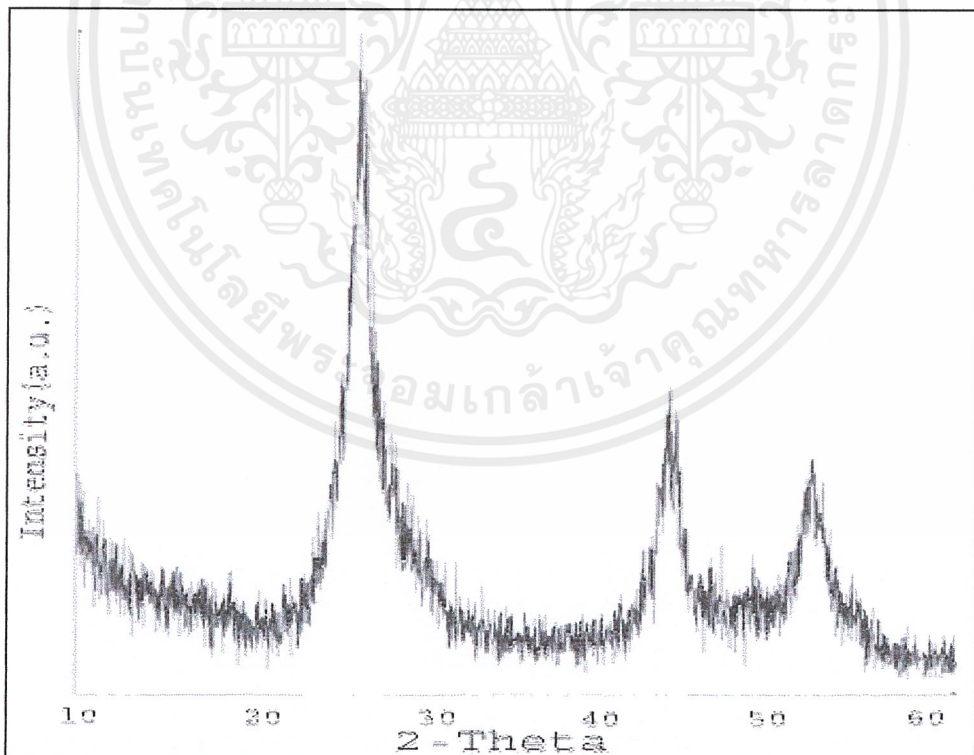
Dx = 8.273

Dm = 3.150

Z = 4

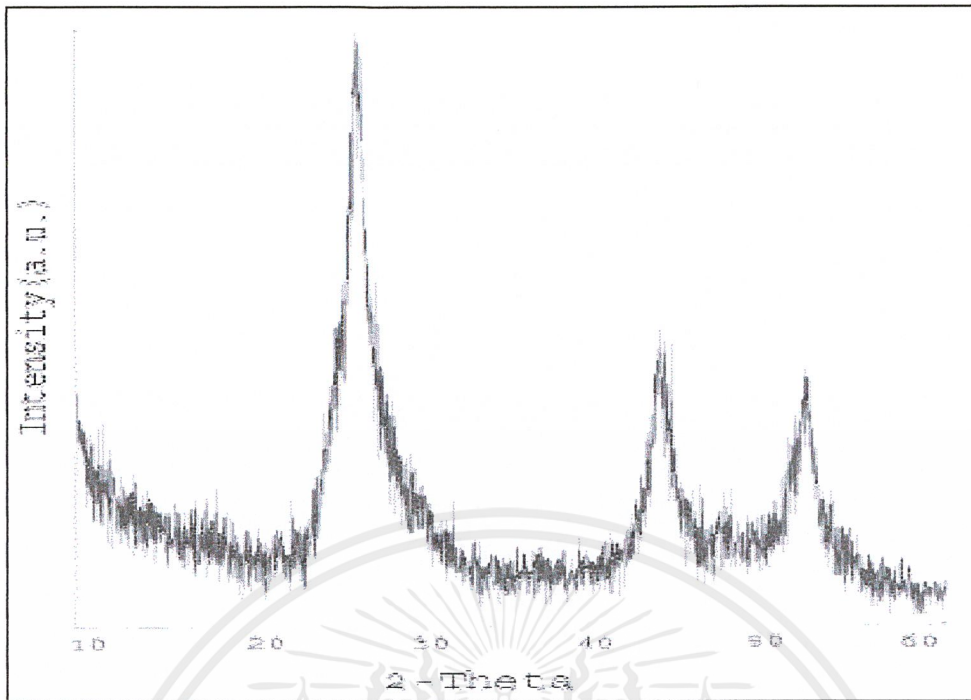


รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตะกอน CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี

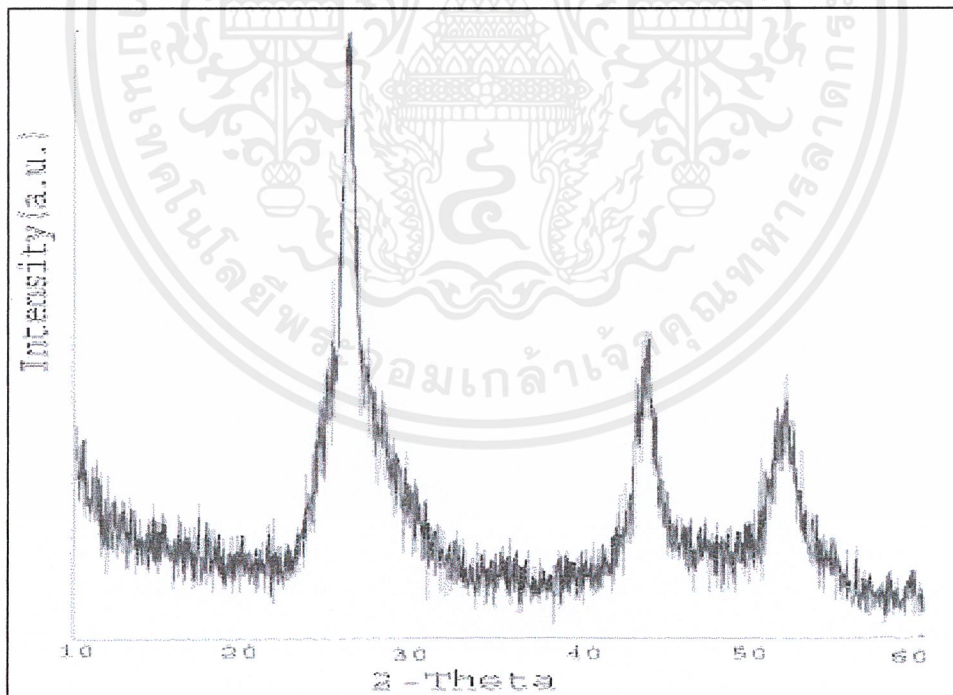


รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตะกอน CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Cu ที่เตรียมโดยวิธีการอาบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตะกอน CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ag ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี



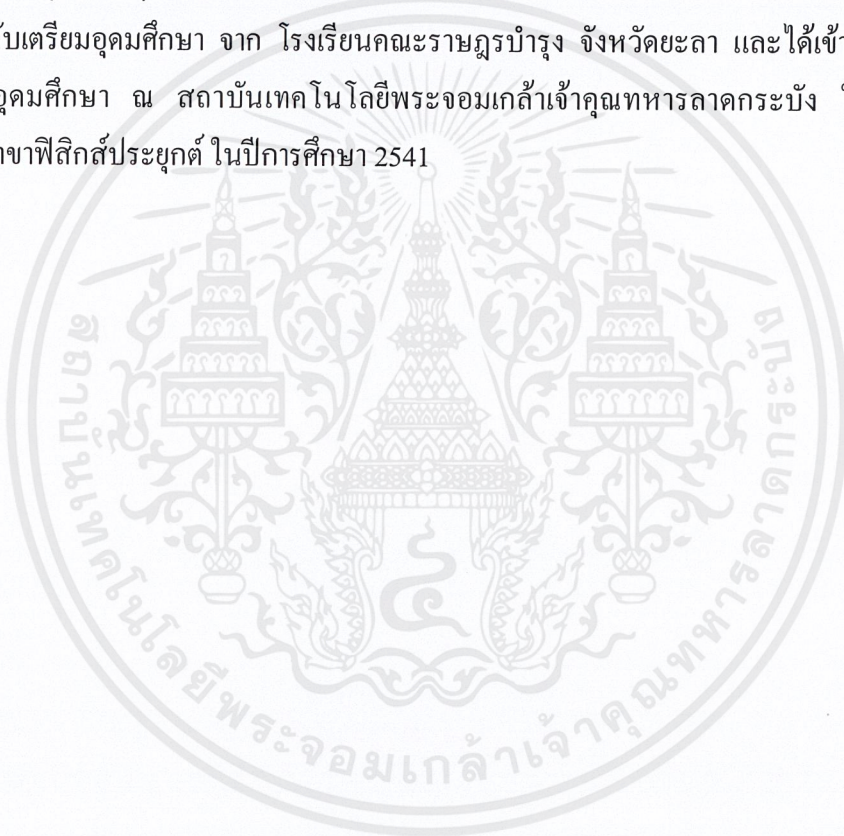
รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของตะกอน CdS ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Mn ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาว วราภรณ์ ตั้งกิจเจริญวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2522 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียนศึกษานารี และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2541

นาย อุดมพร อุชชิน เกิดเมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2523 เป็นคนยะลาโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา จาก โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2541



เอกสารอ้างอิง

1. ดุสิต เครื่องงาม , เซลล์แสงอาทิตย์ สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ , สำนักพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2542 , หน้า 589-590.
2. Tomas S.A., Vigil O., Alvarado-Gil J.J., Lozada-Morales R., Zelaya-Angel O., Vargas H. and Ferreira da Silva A. , “ Influence of Thermal Annealings in Different Atmospheres on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS Thin Films ” , *J.Appl.Phys.* (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. Toshiyuki Yamaguchi, Yukio Yamamoto, Tooru Tanaka and Akira Yoshida. , “ Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thinfilms by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Device ” , *Thin Solid Films* 343-344 , (1999) : 516-519.
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 Films ” , *Thin Solid Films* 289 , (1996) : 238-241.
6. Oladeji I.O., Chow L. , “ A Study of the Ammonium Salts on Chemical Bath Deposited Zinc Sulfide Thin Films ” , *Thin Solid Films* 339 , (1999) : 148-153.
7. Dona J.M., Herrero J. , “ Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Film Characterization ” , *Thin Solid Films* 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. งามนิศย์ แก้วแดง, วิฑิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัชสิงห์ ภูรักษาเกียรติ , “ การเตรียมฟิล์มบางและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง (Cd,Zn)S เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ” , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543.
10. Kittel, C. , *Introduction to Solid State Physics*, 4th ed. , pp. 4-32 , 46-48 , 56-60 , 364-365 , 611-612 , 662-663 , 641-676 , John Wiley&Sons Inc., New York , (1971) .
11. Cullity , B.D. , in *Elements of X-rays Diffraction* , pp.9-14 , Addison-Wesly Publishing Company Inc., 1956.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. สิงห์เดช แดงจวง , “ การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบออบสารละลายเคมี ” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2539.
13. Abelas , F. , in *Optical Properties of Solids* , pp.23-40 , North-Holland , London , 1972 , .
14. Runyan , W.R. , *Semiconductor Measurements and Instrumentation* , pp.67-91 , Mc Graw-Hill , Bombay , New York , 1975.
15. จารุทัศน์ เตชะวิจิตร , สาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์ , หัสพร ทองแดง , “ การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ” , โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543.
16. 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.
17. จักรพันธ์ ทองเจริญ และอภิวัฒน์ กมลทวีกุล , “ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ” , โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2542.
18. Ramirez-Ban, R., Sandoval-Inda, N.C., Espinoza-Beltr' an, F.J., Soteda-Lerma, M., Zelaya-Angel, O. and Falcony, C. , “Structural Transition of Chemically Deposited CdS Films on Thermal Annealing” , *J. Phys. Condens. Matter* 9 , (1997):10051-10058.
19. Hernandez L., de Melo O., Zelaya-Angel O. and Lozada-Morales. , “ Electro-Optical Characterization of Sulfur-Annealed Chemical-Bath Deposited CdS Films ” , *J. Electrochem. Soc.* 115 , (1994) : 3238-3241.
20. Petre D., Pintilie I., Pentis E. and Botila T. , “ The Influence of Cu Doping on Opto-Electronic Properties of Chemically Deposited CdS ” , *Materials Science&Engineering B58* , (1999) : 238-243.
21. Padiyan, D.P. and Radha , C.A., “ Structural , Optical and Electrical Properties of Semiconducting ZnS Thin Film.” , *Bulletin of Electrochemistry* 14 , (1998) : 391 – 393.
22. Lee, J.H. , Lee , H.Y. , Kim , J.H. and Park , Y.K. , “ Heat Treatment of Boron – Doped CdS Films Prepare by Bath Deposition for Solar Cell Applications ” , *Jpn. J. Appl.* (2000) : 1669-1674