สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีเคมี-แสง และผ่านการแอนนีล



นาย ชิตพล ตั้งกมลสุข
นาย วรวุฒิ ถาวรไพศาลกุล
นางสาวอริยา แพทย์พิทักษ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43946
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545

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

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Some Physical Properties of Annealed CdS Thin Films Prepared by Photochemical Deposition

Mr. Chittapon Tangkamolsuk

Mr. Worawut Thawornphisankul

Miss Ariya Phatpitak

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีเคมี-แสง และผ่านการแอนนีล		
โดย	นายชิตพล	ตั้งกมลสุข	รหัสนักศึกษา 41054016
	นายวรวุฒิ	ถาวรไพศาลกุล	รหัสนักศึกษา 41054055
	นางสาวอริยา	แพทย์พิทักษ์	รหัสนักศึกษา 41054081
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์		
อาจารย์ปรึกษา	รศ. งามนิตย์	แก้วแดง	
	รศ.ดร. ฐิตินัย	แก้วแดง	
	ดร. ชัยสิงห์	ภู่รักษ์เกียรติ	

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

_____ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

คณะกรรมการโครงงานพิเศษ

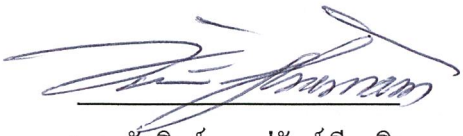
_____ ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

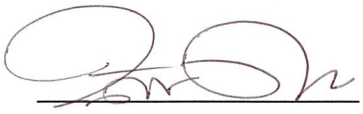
_____ กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง)

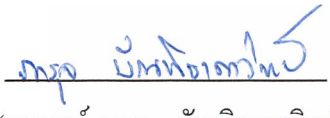
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ดร. ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ) กรรมการ



(อาจารย์ บดินทร์ ดำรงศักดิ์) กรรมการ



(อาจารย์ ภารุจ บัณฑิธาดาวิทย์) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีเคมี-แสง และผ่านการแอนนีล		
โดย	นายชิตพล	ตั้งกมลสุข	รหัสนักศึกษา 41054016
	นายวรวุฒิ	ถาวรไพศาลกุล	รหัสนักศึกษา 41054055
	นางสาวอริยา	แพทย์พิทักษ์	รหัสนักศึกษา 41054081
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. งามนิตย์ แก้วแดง		
	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง		
	ดร. ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ		
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์		
ปีการศึกษา	2544		

บทคัดย่อ

ในโครงงานพิเศษนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งใช้วิธีการเคลือบทางเคมี-แสงบนกระจกสไลด์ และบนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี จากสารละลายของ $CdSO_4$ และ $Na_2S_2O_3$ และทำการแอนนีลฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 100- 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศและภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar ฟิล์มบางก่อนการแอนนีลจะมีโครงสร้างผลึกเป็นคิวบิก และจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮ็กซะโกนอล เมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C จากการวัดการส่งผ่านแสง พบว่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 400°C ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนีล อธิบายโดยปรากฏการณ์ควอนตัมของขนาดเกรนผลึก (quantum size effect) ความไม่เป็นระเบียบของอะตอม (disorder) ในโครงผลึก และการเปลี่ยนเฟสระหว่างคิวบิกกับเฮ็กซะโกนอล อีกทั้งยังได้ศึกษาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง ทั้งขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟไอปรอทความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Some Physical Properties of Annealed CdS Thin Films Prepared by Photochemical Deposition
Name	Mr. Chittapon Tangkamolsuk
	Mr. Worawut Thawornphisankul
	Miss Ariya Phatpitak
Special Project Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Gaewdang
	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang
	Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat
Department	Applied Physics Faculty of Science

Abstract

Cadmium sulfide (CdS) thin films were prepared by photochemical deposition technique from aqueous solution consisting of $CdSO_4$ and $Na_2S_2O_3$ on glass slide substrate and on CBD-CdS seed layer. A set of samples were subjected to thermal annealing in Ar, S_2, air and vacuum with a pressure about 0.1 mbar in the range 100-500°C. The structural transformation from cubic to hexagonal phase can be observed by XRD measurements in the films treated at annealing temperature above 400 °C. The energy gap, evaluated from the optical transmission measurements, was decreased by annealing below 400 °C and then increased by annealing temperature beyond that value. The variation of energy gap of CdS films with annealing temperature was discussed by employing quantum size effect, band tail due to disorder and the cubic-hexagonal phase transition. In addition, sheet resistance was performed on the films in the darkness and under illumination by using a high pressure mercury lamp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง และดร.ชัยสิงห์ ภู่รักเกียรติ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องชั่งสาร , กล่องโลหะลดสัญญาณรบกวนและอิเล็กโตรมิเตอร์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ , เครื่องกวนสารละลายเคมี และตู้อบอุณหภูมิสูง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้กล้องดิจิตอลเพื่อใช้ในการถ่ายรูป และจัดสรรเงินของภาควิชาเพื่อใช้ในการจัดทำโครงงานพิเศษ

ขอขอบคุณ อาจารย์ บดินทร์ ดำรงศักดิ์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคุณศิริพรรณ จันทราสกุล จากศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง surface Profiler ยี่ห้อ Dektak ^{3}st ที่ใช้วัดความหนาของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณกัญญา ศิริโภชน์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องยูวี-วิสสิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อ จัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV-visible spectrometer JUSCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลตและย่านตามองเห็น ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน สุขน้อย และ ดร.ปุณณมา วรพจน์พิศุทธิ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้น้ำปลอดประจุมาใช้ในการทดลองของโครงงานพิเศษ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร โอสถจันทร์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุดม รอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรี พุฒพัฒน์ และ คุณ รวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ และ คุณ จรินทร์ โพธิไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาติให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของโครงงานพิเศษ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้อุปการะทุนสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงงานพิเศษในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การเรียงตัวของอะตอมในของแข็ง	3
2.1 โครงสร้างผลึก	4
2.1.1 บอดีเซนเตอร์คิวบิก	6
2.1.2 เฟสเซนเตอร์คิวบิก	8
2.1.3 เฮ็กซะโกนอลโคลสแพค	9
2.2 ภาวะพหุสัณฐาน	10
2.3 ทิศทางและระนาบในโครงสร้างผลึก	10
2.3.1 ทิศทางในโครงสร้างผลึก	10
2.3.2 ระนาบในโครงสร้างผลึก	11
2.4 ความหนาแน่นอะตอมเชิงเส้นและเชิงระนาบ	12
2.5 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี	13
2.6 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	13
2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	14
2.7.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	14
2.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	15
2.7.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	15
2.7.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	20
2.7.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮ็กซะโกนอล	20
บทที่ 3 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 การเกิดสีของผลึก	21
3.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน	24
3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	26
3.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง	28
3.5 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ CdS	29
3.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	30
บทที่ 4 สมบัติทางไฟฟ้า	32
4.1 สภาพนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ	32
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้า	34
4.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
4.3.1 วิธีวัดโดยตรง	35
4.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว	36
4.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	36
4.4.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์	38
บทที่ 5 การเตรียมฟิล์มบาง CdS จากสารละลายโดยวิธีทางเคมี-แสง (PCD)	41
5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา	41
5.2 การเกิด CdS บนกระจกสไลด์	42
5.3 การทบทวนผลงานที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว	42
บทที่ 6 วิธีทดลองและผลการทดลอง	43
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	43
6.2 การเตรียมแผ่นรองรับ	45
6.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	46
6.3.1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธี CBD	46
6.3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธี PCD	47
6.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	48
6.4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.4.2 ฟิล์มบาง CdS เมื่อมีการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศต่างๆ	50
6.5 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	53
6.6 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	56
6.7 วิธีการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น	70
6.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น	70
6.7.2 วิธีการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น	70
6.7.3 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น	71
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	79
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	81
ภาคผนวก	83
ประวัติผู้เขียน	85
เอกสารอ้างอิง	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบโครงสร้างผลึกทั้ง 7 ระบบ และแลททิสพารามิเตอร์ของแต่ละระบบ 6

ตารางที่6.1 แสดงปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมCdS ด้วยวิธีเคมี-แสง ในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 400 มิลลิลิตร 44

ตารางที่6.2 แสดงปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมCdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี 45

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในบรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20นาที 69

ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในบรรยากาศของก๊าซต่างๆ เป็นเวลา 20นาที 69

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ และบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อไม่ทำการฉายแสง ที่อุณหภูมิแอนนีลต่างๆ ณ บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที 78

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ และบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อทำการฉายแสง ที่อุณหภูมิแอนนีลต่างๆ ณ บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในของแข็ง
ก. ผลึก
ข. อะมอร์ฟัส 2

รูปที่ 2.2 แสดงแกนโคออร์ดิเนต x, y, z เมื่อทาบไปบนขอบหน่วยเซล แสดงให้เห็นระยะตามแกน x, y, z เท่ากับ a, b, c ตามลำดับ และมุมทั้ง 3 ที่กระทำซึ่งกันและกัน 4

รูปที่ 2.3 แสดงการเรียงตัวของอะตอมทั้ง 14 แบบ 5

รูปที่ 2.4 แสดงหน่วยเซลแบบ bcc
ก. แสดงตำแหน่งของอะตอม
ข. แบบจำลองของการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ bcc
ค. 1หน่วยเซลมี2อะตอม
ง. แสดงการคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงผลึก 7

รูปที่ 2.5 แสดงหน่วยเซลแบบ fcc
ก. ตำแหน่งของอะตอมในหน่วยเซล
ข. แบบจำลองการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ fcc
ค. 1หน่วยเซลมี4อะตอม
ง. การคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอม 8

รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยเซลแบบ hcp
ก. เฮ็กซะโกนอลต้องมีแกนเปรียบเทียบ4แกน
ข. หน่วยเซลแบบเฮ็กซะโกนอล1รูป ประกอบไปด้วยหน่วยเซลพื้นฐานที่เป็นแบบรอมบิค (rhombic) 3 หน่วยเซล
ค. การจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซล
ง. แบบจำลองจัดการเรียงตัวของอะตอมแบบ hcp 9

รูปที่ 2.7 แสดงทิศทาง [100], [110] และ [111] ในหน่วยเซล 11

รูปที่ 2.8 แสดงระนาบ (hkl)
ก. (001)
ข. (110)
ค. (111) 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.10 แสดงเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน 14

รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์ 15

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ซึ่งมีไอออนของธาตุ Cs^+ อยู่ที่ตำแหน่ง 000 และมีไอออนของธาตุ Cs^- อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ตามลำดับ 18

รูปที่ 2.13 แสดงริ้วความเข้มที่ปรากฏบนฟิล์มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกอัลลอยด์ CuZn เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบ
ก. ดิสออร์เดอร์ เมื่อ $T>T_c$
ข. ออร์เดอร์ เมื่อ $T<T_c$ 18

รูปที่ 2.14 แสดงพีคความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากออกมาจากระนาบต่างๆ ผงผลึก
ก. KCI
ข. KBr 19

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆที่เป็นอินทรินสิก
ก. ฉนวน
ข. สารกึ่งตัวนำ
ค. ตัวนำ 22

รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพแสดงการส่งผ่านของแสงในฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d 23

รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์(T = 0K)
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์(T = 0K)
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน 26

รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิท 27

รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิท 27

รูปที่ 4.1 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้า 32

รูปที่ 4.2 แสดงการขึ้นกับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ 34

รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า 35

รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว 36

รูปที่ 4.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น 37

รูปที่ 4.6 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d 37

รูปที่ 4.7 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์
ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง
ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด 38

รูปที่ 4.8 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ 39

รูปที่ 6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีเคมี-แสง 44

รูปที่ 6.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่เตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี 45

รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีPCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งกัดด้วยกรด HFเข้มข้น โดยเคลือบ 3 ครั้ง 49

รูปที่ 6.4 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS โดยเคลือบ3ครั้ง 50

รูปที่ 6.5 แสดงฟิล์มบาง PCD- CdS บนแผ่นรองรับ CBD- CdS ที่แอนนีลในอากาศ เป็นเวลา20นาที 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.6 แสดงฟิล์มบาง PCD- CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลในอากาศ เป็นเวลา20นาที 51

รูปที่ 6.7 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลภายใต้สูญญากาศ เป็นเวลา20นาที 51

รูปที่ 6.8 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่แอนนีลภายใต้สูญญากาศ เป็นเวลา20นาที 52

รูปที่ 6.9 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เป็นเวลา20นาที 52

รูปที่ 6.10 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เป็นเวลา20นาที 52

รูปที่ 6.11 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdSที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศซัลเฟอร์ เป็นเวลา20นาที 53

รูปที่ 6.12 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศซัลเฟอร์ เป็นเวลา20นาที 53

รูปที่ 6.13 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที 54

รูปที่ 6.15 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที 55

รูปที่ 6.16 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที 55

รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.18 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศเป็นเวลา 20 นาที 57

รูปที่ 6.19 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 300-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์เป็น เวลา 20 นาที 58

รูปที่ 6.20 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที 58

รูปที่ 6.21 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที 59

รูปที่ 6.22 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศเป็นเวลา 20 นาที 59

รูปที่ 6.23 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 300-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ เป็นเวลา 20 นาที 60

รูปที่ 6.24 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1 mbar เป็นเวลา 20 นาที 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่ไม่ได้แอนนีล 62

รูปที่ 6.26 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 62

รูปที่ 6.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 63

รูปที่ 6.28 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 63

รูปที่ 6.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 64

รูปที่ 6.30 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 64

รูปที่ 6.31 แสดงกราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.32 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่ไม่ได้แอนนีล 65

รูปที่ 6.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20นาที 66

รูปที่ 6.34 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 66

รูปที่ 6.35 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 67

รูปที่ 6.36 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 67

รูปที่ 6.37 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที 68

รูปที่ 6.38 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบน แผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีลในบรรยากาศ ของก๊าซอาร์กอน 68

รูปที่ 6.39 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น 70

รูปที่ 6.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่ เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อไม่มีการแอนนีล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2 73

รูปที่ 6.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2 74

รูปที่ 6.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีล ของฟิล์มบาง PCD-CdSที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2 74

รูปที่ 6.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในอากาศเป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2 75

รูปที่ 6.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์ 75

รูปที่ 6.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีล ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์ 76

รูปที่ 6.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์ 76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสง ด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์ 77

รูปที่ 6.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์ 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง (optoelectronics) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้งานบนพื้นโลก ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปของซิลิกอน (Si polycrystalline) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน หลังจากที่มีการค้นพบสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบชาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) โดยเฉพาะ $CuInSe_2$ และ $CuInGaSe_2$ ซึ่งได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ MgF_2/ZnO/CdS/$CuInGaSe_2$/Mo/Sodalime glass ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 17.7% [1]

สำหรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS)เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) 2.42eV ที่ 300K และ 2.56eV ที่ 0 K [2]โดยชนิดของช่องว่างแถบพลังงานมีลักษณะโครงสร้างแบบตรง (direct band gap) และมีลักษณะโครงสร้างสองแบบ คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ทไซท์ (wirtzite) ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบางนี้สามารถเตรียมโดยเทคนิคที่หลากหลาย แต่เทคนิคที่ได้ถูกพัฒนามาใช้ในการเตรียมฟิล์มบางนี้ คือ เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางจากสารละลายด้วยวิธีทางเคมีแสง (photochemical deposition : PCD) ซึ่ง CdS จะถูกเคลือบบนแผ่นรองรับ (substrate) ที่อยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วย $S_2O_3^{2-}$ และ Cd^{2+} โดย $S_2O_3^{2-}$ จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 254nm [3-7] โดยในกระบวนการPCDนี้เป็นกระบวนการเคลือบสารโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้าซึ่งจะสามารถจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) รีดักชัน (reduction) โดยใช้แสงกระตุ้น พบว่าการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีPCDนี้จะทำให้ผลึกหลายรูป (polycrystalline) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นเฮ็กซะโกนอลหรือคิวบิก (cubic) และฟิล์มบางจะเป็นไปตามสัดส่วนทางเคมี (stoichiometry) เมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิมากกว่า 300°C ซึ่งข้อดีสำหรับการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีPCDนี้ คือสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ขนาดพื้นที่ใหญ่ ราคาถูก และยังสามารถควบคุมได้โดยวิธีการเปิด,ปิดแสง ซึ่งเหมาะในการไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี และราคาต่ำได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มจากสารละลายด้วยวิธีทางเคมีแสง และนำไปแอนนีล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นต้น
2. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบาง CdS เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
4. วัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ของฟิล์มบาง

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าหาข้อมูลจากรายงานที่ผ่านการตีพิมพ์มาแล้ว
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีทางเคมี-แสง
3. ทำการเตรียมสารตัวอย่าง (sample)
4. นำสารตัวอย่างที่ได้ไปแอนนีล ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นต้น
5. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
6. ทำการศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบาง CdS เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
7. วัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ของฟิล์มบางภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสง จากหลอดไฟฮาโลเจน และหลอดไฟไอปรอทความดันสูง

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงานพิเศษ

สามารถทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิค PCD และทำให้ทราบถึงเงื่อนไข วิธีการศึกษาสมบัติต่างๆ และการใช้เครื่องมือในการหาลักษณะโครงสร้าง เพื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ในการใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ MgF_2/ZnO/CdS/$CuInGaSe_2$ /Mo/Sodalime glass ต่อไปในอนาคต

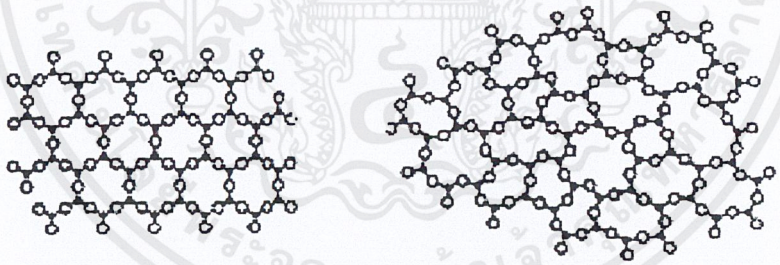
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การเรียงตัวของอะตอมในของแข็ง

การเรียงตัวของอะตอมในของแข็งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ [8-11]

1. ผลึก (crystalline materials) ของแข็งที่เป็นผลึกจะมีอะตอม กลุ่มอะตอมหรือโมเลกุล เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในช่วงยาว ๆ และซ้ำกันทั้ง 3 มิติ วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึก เช่น โลหะ เซรามิกซ์ หรือโพลีเมอร์บางชนิด
2. อะมอร์ฟัส (amorphous materials) การเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบหรือเป็นระเบียบในช่วงสั้น ๆ วัสดุที่มีโครงสร้างอะมอร์ฟัส เช่น แก้ว

โดยทั่วไปแล้วของแข็งที่มีพันธะแบบไม่มีทิศทาง (พันธะโลหะ หรือ พันธะอิออนิค) จะเป็นผลึกเสมอขณะที่ของแข็งที่มีพันธะแบบมีทิศทาง (พันธะโควาเลนท์) อาจเป็นผลึกหรือสัณฐานก็ได้ รูปที่ 2.1 แสดงถึงโครงสร้างผลึก และอะมอร์ฟัส



(ก) (ข)

รูปที่ 2.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในของแข็ง
ก. ผลึก
ข. อะมอร์ฟัส

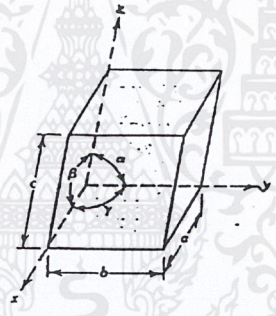
การศึกษาโครงสร้างผลึกของแข็งนั้น จะสมมติให้อะตอมหรืออิออน มีรูปร่างเป็นทรงกลมมีขนาดที่แน่นอน และนำข้อมูลสมมุตินี้ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผลึกต่าง ๆ โดยมีอะตอมที่เป็นรูปทรงกลมนี้ จะสัมผัสกับอะตอมอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันในโครงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 โครงสร้างผลึก (crystal structures) [8-11]

ตำแหน่งต่าง ๆ ในโครงผลึกที่อะตอมหรือกลุ่มอะตอม อยู่เรียกว่า แลททิส (lattice) และในโครงผลึกมีหน่วยย่อยที่สุดที่มีการเรียงตัวซ้ำ ๆ กัน หรือหน่วยย่อยที่สุดที่จะบ่งถึงลักษณะการเรียงตัวของอะตอม หรือกลุ่มอะตอมของโครงผลึกแต่ละชนิด เรียกว่า หน่วยเซล (unit cell)

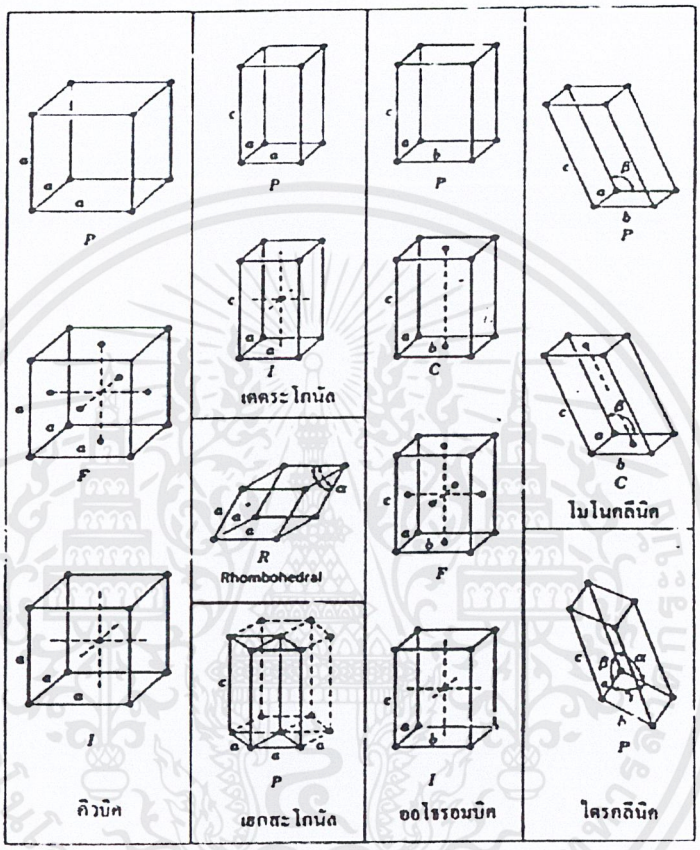
การศึกษาการเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึกซึ่งมีอยู่ได้หลายแบบนั้น ต้องอาศัยแกนอ้างอิงเป็นแกนเปรียบเทียบ ซึ่งแกนที่ใช้นี้เป็นแกนโคออร์ดิเนต x, y, z โดยเอาแกนนี้ไปวางให้จุดกำเนิดอยู่ ณ.อะตอมใด อะตอมหนึ่งในหน่วยเซล และแกน x, y, z ทาบไปกับขอบของหน่วยเซลนั้น ความยาวด้านของหน่วยเซล ตามแกน x, y, z คือ a, b, c และมุมที่แต่ละแกนทำต่อกันและกัน คือ α, β, γ ดังในรูปที่ 2.2 ระยะ ก, ข, ค และ มุม α, β, γ เรียกว่าแลททิสพารามิเตอร์ (lattice parameters) ซึ่งมีค่าเฉพาะตามชนิดของโครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.2 แสดงแกนโคออร์ดิเนต x, y, z เมื่อทาบไปบนขอบหน่วยเซล แสดงให้เห็นระยะตามแกน x, y, z เท่ากับ a, b, c ตามลำดับ และมุมทั้ง 3 ที่กระทำซึ่งกันและกัน

โครงสร้างผลึกที่พบอยู่มีอยู่ 7 ชนิด ดังในตารางที่ 2.1 และสามารถแบ่งย่อยออกเป็นเป็น14 แบบ ซึ่งเรียกว่า บราเวียส แลททิส (bravais lattices) ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมทั้ง 14 แบบ

P - หน่วยเซลพื้นฐาน(primitive cell)

C - มีอะตอมอยู่ตรงกลางด้านที่ขนานกัน

F - มีอะตอมอยู่ตรงกลางด้านทุกด้าน

I - มีอะตอมอยู่ตรงกลางหน่วยเซล

R - หน่วยเซลพื้นฐานที่เป็นแบบรอมโบฮีดรัลแบบง่าย (rhombohedral primitive cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบโครงสร้างผลึกทั้ง 7 ระบบ และแลททิสพารามิเตอร์ของแต่ละระบบ

Crystal system	Axial lengths and interaxial angles	Space lattice
Cubic	Three equal axes at right angles $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple cubic Body-centered cubic Face-centered cubic
Tetragonal	Three axes at right angles, two equal $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple tetragonal Body-centered tetragonal
Orthorhombic	Three unequal axes at right angles $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90°$	Simple orthorhombic Body-centered orthorhombic Base-centered orthorhombic Face-centered orthorhombic
Rhombohedral	Three equal axes, equally inclined $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	Simple rhombohedral
Hexagonal	Two equal axes at 120°, third axis at right angles $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$	Simple hexagonal
Monoclinic	Three unequal axes, one pair not at right angles $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	Simple monoclinic Base-centered monoclinic
Triclinic	Three unequal axes, unequally inclined and none at right angles $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	Simple triclinic

โลหะส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างผลึกที่มีจัดเรียงกันตัวของอะตอมหนาแน่นที่สุด ซึ่งจะมักพบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็น

1. บอดีเซนเตอร์คิวบิก (body-centered cubic)
2. เฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic)
3. เฮ็กซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close-packed)

2.1.1 บอดีเซนเตอร์คิวบิก (body-centered cubic) [8-11]

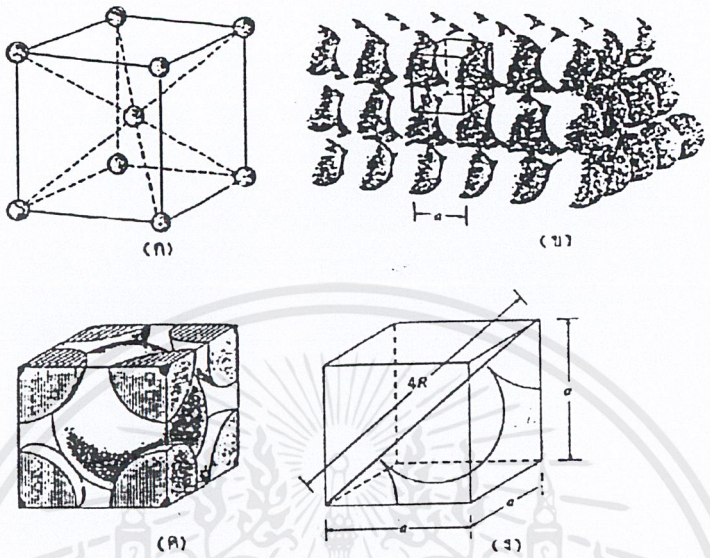
หน่วยเซลของ bcc จะมีอะตอมอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของรูปทรงลูกบาศก์ และมีอะตอมอยู่ตรงกลางอีก 1 อะตอม ดังรูปที่ 2.4

เส้นทแยงมุมลูกบาศก์ (b.d) bcc $= 4R = a_{bcc}\sqrt{3}$

$$a_{bcc} = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

a_{bcc} = ระยะห่างระหว่างอะตอมของ bcc (lattice constant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงหน่วยเซลแบบ bcc
ก) แสดงตำแหน่งของอะตอม
ข) แบบจำลองของการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ bcc
ค) 1 หน่วยเซลมี 2 อะตอม
ง) แสดงการคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอมใน โครงผลึก

นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่สำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกดังนี้

- เลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number) คือ จำนวนอะตอมที่อยู่ใกล้กับอะตอมที่พิจารณามากที่สุด สำหรับ bcc มีค่า = 8
- แฟกเตอร์แสดงความหนาแน่นของอะตอม(atomic packing factor, APF)

APF_{bcc} = ปริมาตรของอะตอมใน 1 หน่วยเซล / ปริมาตรของหน่วยเซล

$$APF_{bcc} = \frac{2\left[4\pi R^3\right]}{a^3} = \frac{2\left[4\pi R^3/3\right]}{\left(4R/\sqrt{3}\right)^3} = 0.68$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากทราบชนิดของหน่วยเซลของวัสดุนั้น และรัศมีอะตอมก็จะสามารถหาความหนาแน่นของวัสดุนั้นได้ หรือหากทราบความหนาแน่น และชนิดของโครงสร้างสามารถหารัศมีของอะตอมและระยะห่างระหว่างอะตอมได้จากน้ำหนักของอะตอม ต่อ 1 หน่วยเซล $= \frac{nM}{N_A}$

M = น้ำหนักอะตอม (atomic weight)

N_A = เลขอาโวกาโดร

n = จำนวนอะตอมใน 1 หน่วยเซล

หาก a = ระยะห่างระหว่างอะตอม หรือความยาวด้านของหน่วยเซล

$\rho = nM / (a^3 N_A)$

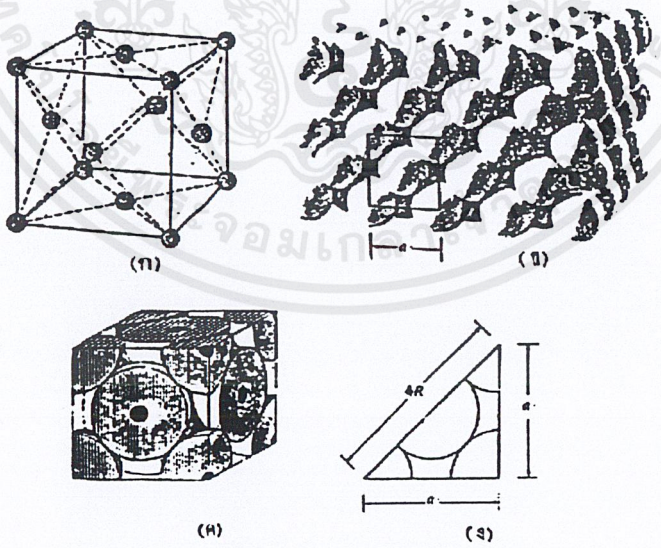
$\rho = nM / (V N_A)$

V = ปริมาตรของหน่วยเซล

โลหะที่มีโครงสร้างเป็น bcc เช่น เหล็กที่อุณหภูมิห้อง, โครเมียม, ทังสเตน และไนโอเบียม เป็นต้น

2.1.2 เฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic) [8-11]

อะตอมจะอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของหน่วยเซล และอยู่ตรงกลางด้านทั้ง 6 ด้านของหน่วยเซล แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงหน่วยเซลแบบ fcc

ก) ตำแหน่งของอะตอมในหน่วยเซล

ข) แบบจำลองการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ fcc

ค) 1 หน่วยเซลมี 4 อะตอม

ง) การคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทแยงมุมของด้าน $(f.d.)_{fcc} = 4R = a_{fcc}\sqrt{2}$

$$a_{fcc} = \frac{4R}{\sqrt{2}}$$

a_{fcc} = ระยะห่างระหว่างอะตอมของ fcc (lattice constant)

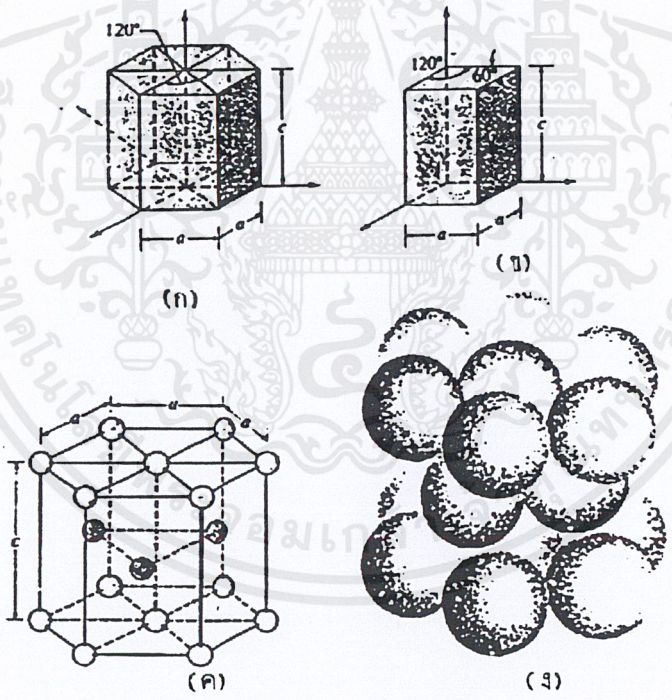
เลขโคออร์ดิเนชัน ของ fcc = 12

อัตราการบรรจุของ fcc = 0.74

โลหะที่มีโครงสร้างเป็น fcc เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เงิน ตะกั่ว นิกเกิล เป็นต้น

2.1.3 เฮ็กซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal close-packed : hcp) [8-11]

อะตอมจะอยู่ที่มุมทั้ง 12 ของทรงหกเหลี่ยม และจะอยู่ภายในรูปหกเหลี่ยมอีก 3 อะตอม ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงหน่วยเซลของ hcp

ก) เฮ็กซะโกนอลต้องมีแกนเปรียบเทียบ 4 แกน

ข) หน่วยเซลแบบเฮ็กซะโกนอล 1รูป ประกอบไปด้วย หน่วยเซลพื้นฐานที่เป็นแบบรอมบิค (rhombic) 3หน่วยเซล

ค) การจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซล

ง) แบบจำลองการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบ hcp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขโคออร์ดิเนชัน = 12 c/a = 1.63 โลหะที่มีโครงสร้าง hcp อาจมีค่าต่างไปจากนี้ได้บ้าง อัตราการบรรจุ = 0.74 โลหะที่มีโครงสร้าง hcp เช่น แคดเมียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม และสังกะสี

2.2 ภาวะพหุสัณฐาน (polymorphism or allotropy) [8-11]

โลหะหรืออโลหะมักมีโครงสร้างผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด ซึ่งโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม โดยจะเรียกว่าภาวะพหุสัณฐาน เช่น กราไฟต์เป็นพหุสัณฐานที่อุณหภูมิปกติ แต่เพชรซึ่งเป็นคาร์บอนเหมือนกันจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับความดันสูงมาก ตัวอย่างที่สำคัญ ก็คือเหล็กบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 912 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกเป็น bcc และระหว่าง 912 องศาเซลเซียส – 1390 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกเป็น fcc และอุณหภูมิ 1390 องศาเซลเซียส – 1534 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกกลับมาเป็น bcc อีกครั้ง ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1534 องศาเซลเซียส เหล็กจะหลอมเหลว

ในกรณีที่วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ความหนาแน่น และสมบัติทางกลจะเปลี่ยนไปด้วย

2.3 ทิศทางและระนาบในโครงสร้างผลึก (crystallographic directions and planes) [8-11]

เมื่อต้องการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของวัสดุ สิ่งที่จำเป็นต้องทราบคือ ระนาบของอะตอมในโครงสร้างผลึกนั้น และทิศทางของอะตอมเมื่อเทียบกับอะตอมในอะตอมหนึ่ง การบอกระนาบและทิศทางจะใช้ตัวเลขจำนวนเต็ม 3 ตัว หรือที่เรียกว่า ดัชนี โดยต้องอาศัยแกนโคออร์ดิเนต x, y, z ดังในรูปที่ 2.2 ให้จุดกำเนิดของหน่วยเซล และแกนทั้ง 3 ทาบไปบนของของหน่วยเซล

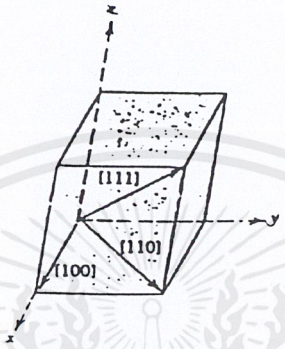
2.3.1 ทิศทางในโครงสร้างผลึก (crystallographic directions) [8-11]

ทิศทางระหว่างจุด 2 จุด ในโครงผลึกเป็นเวกเตอร์ และสามารถบอกทิศทางของเวกเตอร์นี้โดยเขียนอยู่ในรูปของ ดัชนีทิศทาง ซึ่งสามารถหาได้โดย

1. เวกเตอร์ (ระยะและทิศทางระหว่างจุด 2 จุด) ที่ต้องการหา ต้องผ่านจุดกำเนิดของแกน x, y, z ถ้าไม่ผ่าน ต้องเลื่อนเวกเตอร์นั้นมาที่จุดกำเนิด แต่ต้องให้เวกเตอร์ขนานกับเวกเตอร์เดิมด้วย
2. หาระยะโปรเจกชันของเวกเตอร์ (vector projection) ตามแนวแกนทั้ง 3 ในเทอมของ a, b, c ถ้าขนานกับแกนใดให้ถือว่าตัดแกนนั้นที่อนันต์
3. ทำให้ a, b, c นั้นเป็นเศษส่วนกลับแล้วจากนั้นทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุด
4. เขียนตัวเลขจำนวนเต็มที่ได้ในวงเล็บใหญ่ [ ] โดยไม่มีเครื่องหมายใด ๆ กั้น ระหว่างตัวเลข เช่น [u v w] เมื่อ u, v, w เป็นระยะโปรเจกชัน ของเวกเตอร์ตามแกน x, y, z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแกนทั้ง 3 มีทั้งในระยะที่เป็นบวก และลบ ดังนั้น หากได้ดัชนีของทิศทางที่มีค่าเป็นลบ จะเขียนเครื่องหมายลบได้บนตัวเลขนั้น เช่น [1 1 1] และ [1 1 1] จะขนานกัน แต่มีทิศตรงกันข้าม ตัวอย่างทิศทาง [100], [110] และ [111] แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทาง [100], [110] และ [111] ในหน่วยเซล

2.3.2 ระนาบในโครงสร้างผลึก (crystallographic planes) [8-11]

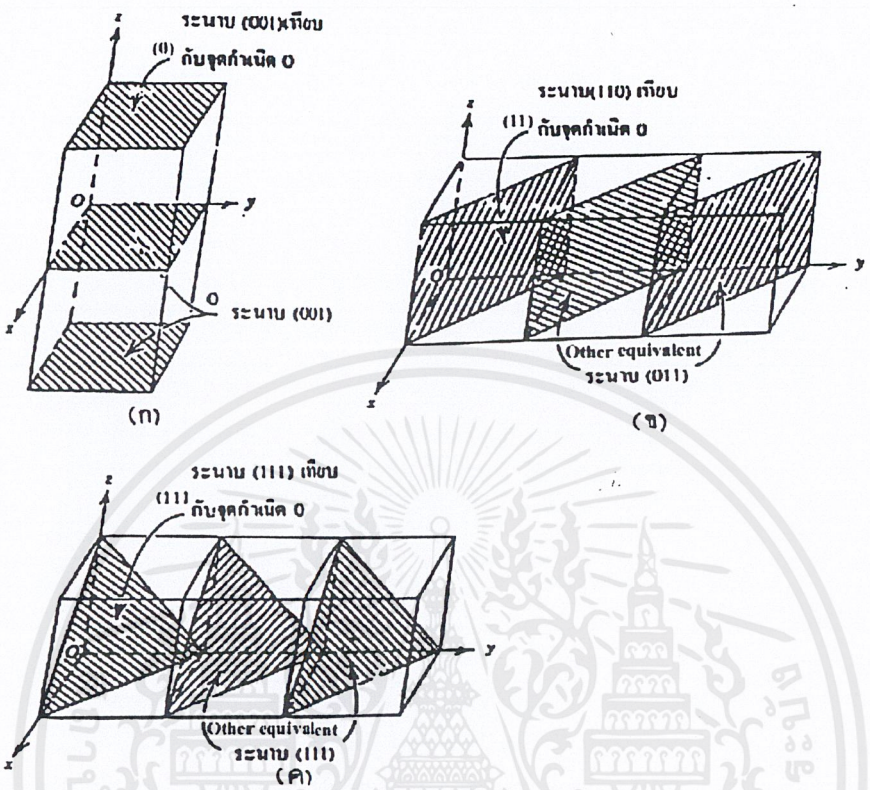
ระนาบในโครงสร้างผลึกก็แทนด้วยดัชนีระนาบ โดยใช้แกน x, y, z เหมือนกับดัชนีทิศทาง ดังในรูปที่ 2.2 ดัชนีระนาบ (miller indices: h k l) หากระนาบขนานกันจะมีดัชนีระนาบเหมือนกัน

การหาค่า h, k, l หาได้ดังนี้

1. หาระนาบผ่านจุดกำเนิด ให้เลื่อนจุดกำเนิดไปที่อื่น หรือเลือกระนาบอื่นที่ขนานกับระนาบเดิม
2. หาจุดที่ระนาบตัดแกน x, y, z โดยให้บอกระยะตัดแกนในเทอม a, b, c
3. ทำให้ a, b, c นั้นเป็นเศษส่วนกลับ ดังนั้น หากระนาบขนานกับแกนใดแกนหนึ่ง หมายความว่าระนาบจะตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) เมื่อกลับเศษเป็นส่วน $1/\infty = 0$
4. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุด
5. เขียนให้ตัวเลขทั้ง 3 อยู่ในวงเล็บเล็ก (h k l) โดยไม่มีเครื่องหมายระหว่างตัวเลข

หากระนาบตัดแกนในระยะที่เป็นลบ ดังนั้น ดัชนีระนาบนั้นจะมีค่าเป็นลบ และจะเขียนเครื่องหมายลบไว้ด้านบนของตัวเลขนั้น ตัวอย่างระนาบดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงระนาบ(hkl)

ก. (001)

ข. (110)

ค. (111)

ในระบบคิวบิก หากดัชนีระนาบ และดัชนีทิศทางเหมือนกัน ระนาบและทิศทางนั้นจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน

2.4 ความหนาแน่นอะตอมเชิงเส้น และเชิงระนาบ (linear and planar atomic densities) [8-11]

ความหนาแน่นเชิงเส้น (linear density) คือ สัดส่วนของความยาวของเวกเตอร์ทิศทางในโครงผลึก ที่ผ่านกึ่งกลางของทุกอะตอม ต่อความยาวทั้งหมดของเวกเตอร์นั้น

ความหนาแน่นเชิงระนาบ (planar density) คือสัดส่วนของพื้นที่ของทุกอะตอมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บนระนาบนี้ (อะตอมมีรูปทรงเป็นทรงกลม) ต่อพื้นที่ทั้งหมดของระนาบนั้น

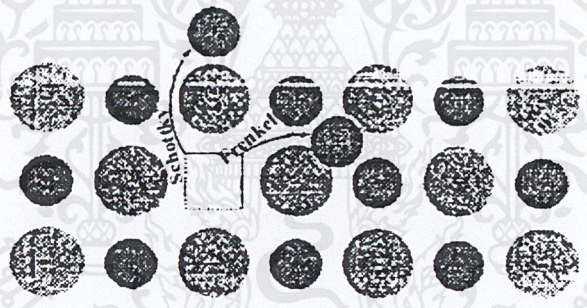
ความหนาแน่นเชิงเส้น และความหนาแน่นเชิงระนาบ เปรียบเหมือนแฟกเตอร์แสดงความหนาแน่นของอะตอม (packing factor) ใน 1 และ 2 มิติ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นเชิงระนาบ และเชิงเส้นนี้ มีความสำคัญต่อการเลื่อนผ่านกันของอะตอมที่เรียกว่า สลิป (slip) ซึ่งก็คือการเลื่อนผ่านกันบนระนาบในขณะที่เกิดการผิดรูปของโครงผลึก (deformation) อะตอมของโลหะจะเกิดการเลื่อนผ่านกัน บนระนาบที่มีจำนวนอะตอมหนาแน่นที่สุด และในทิศทางที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นมากที่สุดเช่นกัน

2.5 ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี [8,9]

ข้อบกพร่องแบบแวแคนซีเป็นข้อบกพร่องผลึกแบบจุดซึ่งคือข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากโครงผลึกแบ่งเป็นสองชนิด คือ ข้อบกพร่องผลึกชนิด ชอตกี้ (schottky defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอม หรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้า (surface) ของโครงผลึก และข้อบกพร่องผลึกชนิดเฟรนเคล (frendel defect) เป็นข้อบกพร่องผลึกแบบที่มีอะตอม หรือไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกหลุดหายไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของดังแสดงในรูปที่ 2.9

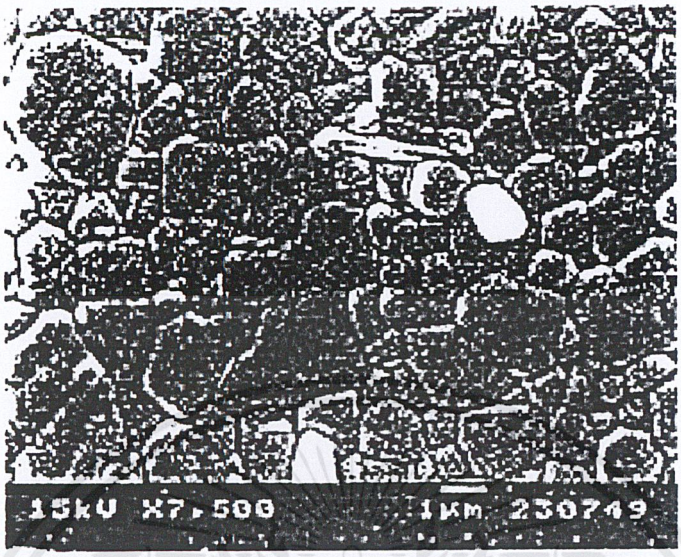


รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซีชนิดชอตกี้ และชนิดเฟรนเคล

2.6 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน [8,9]

เกรนคือ บริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัว (orientation) ในทิศทางเดียวกัน และแนวพรมแดนระหว่างเกรนต่างๆที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกในทิศทางแตกต่างกัน เรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ผลึกที่มีเกรนเดียว (single grain) จะเรียกว่าผลึกเดี่ยว หรือผลึกเอกพันธ์ (single crystalline) ผลึกที่มีหลายเกรน เรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากกรณีผลึกในอุดมคติ ได้แก่ ขอบเขตรอยต่อของเกรนจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสกัดกั้นการไหลของกระแส หรือถ้าขอบเขตรอยต่อของเกรนกักอะตอมโมเลกุล หรือไอออนของสารบางตัวไว้ ก็อาจมีผลทำให้เกิดการนำกระแสได้มากขึ้นเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงเกรน และขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.7 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

2.7.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [8,9,11]

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีพลังงานสูง มีความยาวคลื่นสั้น มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2-2 A° ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า มีอันตรกิริยากับสารน้อยมาก มีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค คือเป็นการพิจารณาในระดับการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึก เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ หรือน้อยกว่าขนาดของค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) คือให้ $\lambda \leq a$ หรือที่มีค่าความยาวคลื่นเกือบเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอม (interatomic spacing) คือให้ $\lambda \approx 10^{-8} cm$ หรือ $\lambda \approx 1A^{\circ}$ หรือที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ หรือน้อยกว่าสองเท่าของระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (distance of planes) คือให้ $\lambda \leq 2d$ ดังรูปที่ 2.11 ตกกระทบผลึกที่ ทำหน้าที่เป็นเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ออกมาจากระนาบของผลึกแบบมีเฟสตรงกัน (in phase) แล้วจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interferrence) ตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มที่รองรับ แต่ถ้าเป็นชุดอุปกรณ์แบบดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (diffractometers) ก็จะมีหัววัดซินทิลเลชันเคาท์เตอร์ (scintillation counters tubes) หรือ พรอพพอร์ชันนัลเคาน์เตอร์ (proportion counter tube) ที่ใช้สำหรับตรวจวัดความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากผลึก ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่เรียกว่า "กฎของแบรกก์" ขึ้นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d_{hkl}\ \sin\theta = n\lambda \qquad (2.1)$$

โดยที่

$$\lambda(A^{\circ}) = \frac{12.4}{\epsilon\,(keV)}$$

$$\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

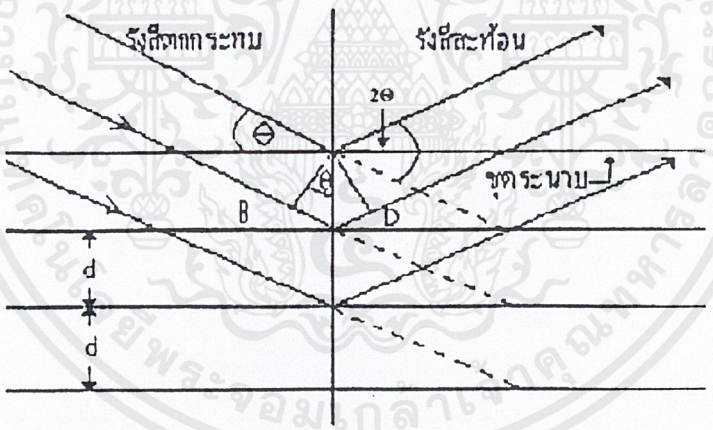
d_{hkl} คือระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

θ คือมุมสะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

n คือออันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1,2,3...

h คือค่าคงตัวของแพลงค์ (plank constant) $= 6.62 \times 10^{-34}$ J s

1eV $= 1.6 \times 10^{-19} J$, $1A^{\circ} = 1 \times 10^{-8} cm = 1 \times 10^{-10} m$



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

2.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากริ้วการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ โดยจากพิจารณาดังต่อไปนี้

2.7.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก [8,9,11]

เราสามารถหาพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s(hkl) = \sum_j f_j \exp\left[-i2\pi\left(x_j h + y_j k + z_j l\right)\right] \qquad (2.2)$$

โดยที่ S(hkl) = ค่าแฟกเตอร์โครงสร้าง (structure factor)

X_j, Y_j, Z_j = ตำแหน่งของอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ที่ตำแหน่ง

(hkl) = ดัชนีมิลเลอร์

$I = \left|S(hkl)\right| = S(hkl)S^*(hkl)$ = ค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

f_j = อะตอมมิคฟอร์มแฟกเตอร์ (atomic form factor)

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

เมื่อ $\rho = \gamma - \gamma_j$ = เวกเตอร์ลัพธ์ของอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ที่ตำแหน่ง γ_j เทียบกับอะตอมที่ j อยู่ที่ตำแหน่ง γ ใดๆ

γ_j = เวกเตอร์ที่ลากจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดศูนย์กลางของอะตอมที่พิจารณาที่ตำแหน่ง γ_j

$n_j(\rho)$ = ฟังก์ชั่นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอมที่พิจารณาที่อยู่ที่ตำแหน่ง γ_j ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอะตอมที่อยู่ที่ตำแหน่ง γ ใดๆ

G = เวกเตอร์รีซิโปคอลแลททิส (reciprocal lattice vector)

โดยที่ G=hA+kB+lC

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

V = ปริมาตรทั้งหมดของหน่วยเซล (unit cell)

พิจารณาผลึกอัลลอยด์ CuZn ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นแบบออร์เดอร์ และดิสออร์เดอร์ตามลำดับ โดยมีอะตอมของธาตุ Cu อยู่ที่ตำแหน่ง 000 และอะตอมของธาตุ Zn อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ จากสมการ(2.2)จะได้ว่า

กรณีที่ 1 : เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์

$$\langle s(hkl)\rangle = \langle f\rangle + \langle f\rangle e^{-i\pi(h+k+l)} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เนื่องจากภายในโครงผลึกของ CuZn จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุ Cu และของธาตุ Zn ที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบสุ่ม ดังนั้น

$$\langle f \rangle = \frac{1}{2}(f_{Cu} + f_{Zn}) \qquad (2.4)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (2.3) จะได้ว่า <s(hkl)> = 0 h+k+l =เป็นเลขคี่ ด้วยเหตุนี้จึงไม่ปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ค่า h + k + l = เลขคี่ แต่ที่ค่า (hkl) นอกเหนือจากนั้นจะปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.13 ก

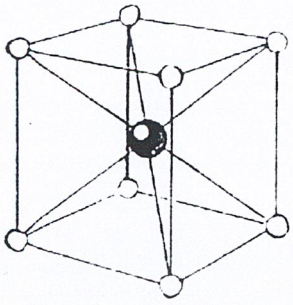
กรณีที่ 2 : เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบออร์เดอร์

$$s(hkl) = f_{Cu} + f_{Zn}e^{-i\pi(h+k+l)} \qquad (2.5)$$

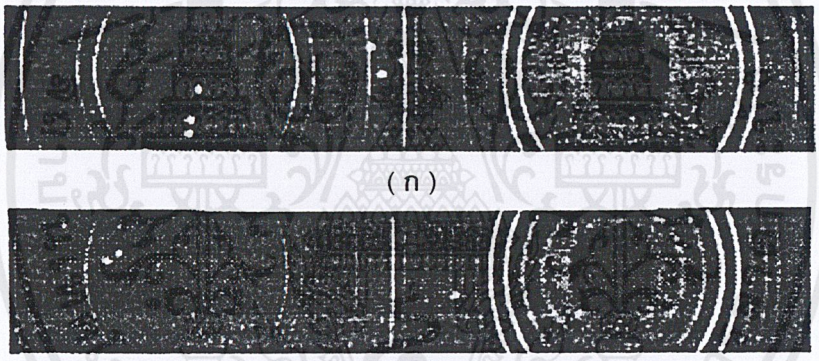
เนื่องจากภายในโครงผลึกของ CuZn จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมของธาตุ Cu และ Zn แบบเป็นคาบในระยะยาว ดังนั้น $f_{Cu} \neq f_{Zn}$ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 4 จะได้ว่า $S(hkl) \neq 0$ ด้วยเหตุนี้จึงปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทุกพีคทั้งหมดที่ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ข เรียกว่าเส้นเอ็กซ์ตร้า หรือเส้นซุปเปอร์สตรัคเจอร์ (extra line หรือ superstructure lines) จึงเป็นการแสดงว่า การจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลทำให้ปรากฏจำนวนพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบดิสออร์เดอร์จะทำให้ปรากฏจำนวนพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกน้อยกว่าแบบออร์เดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43946



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ CsCl หรือแบบ bcc ซึ่งมีไอออนของธาตุ Cs^+ อยู่ที่ตำแหน่ง 000 และมีไอออนของธาตุ Cs^- อยู่ที่ตำแหน่ง $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ ตามลำดับ



(ก)

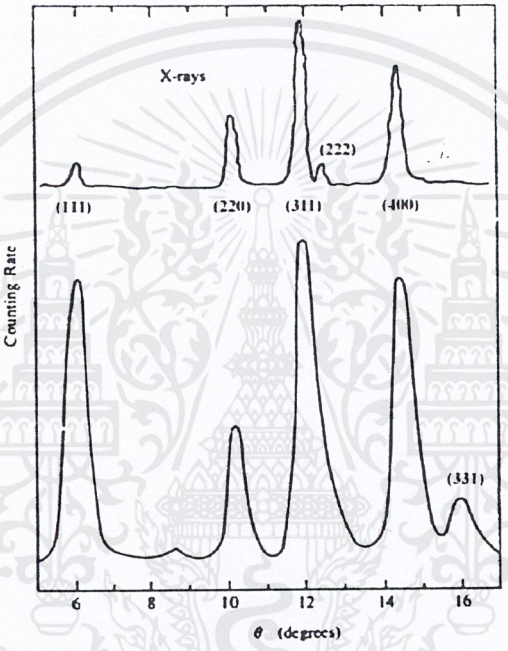
(ข)

รูปที่ 2.13 แสดงริ้วความเข้มที่ปรากฏบนฟิล์มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผลึกอัลลอยด์ CuZn เมื่อมีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบ
ก. ดิสออร์เดอร์ เมื่อ $T>T_c$
ข. ออร์เดอร์ เมื่อ $T<T_c$

นอกจากนี้การปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึกยังขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงตัวอะตอม หรือกลุ่มของอะตอมที่เรียกว่า เบสิสที่มีอยู่ในโครงผลึกนั้น การกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ตำแหน่งของนิวเคลียส ตำแหน่งของระนาบของอะตอมตลอดจนจำนวนประจุสุทธิของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ พิจารณาพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้ออกมาจากผงผลึก KCl และ KBr ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทั้งผงผลึก KCl และ KBr มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ fcc แต่ KCl มีจำนวนอิเล็กตรอนของไอออนของธาตุ K^+ และไอออนของธาตุ Cl^- เท่ากัน ค่า $f_j(K^+)$ และ $f_j(Cl^-)$ มีค่าเกือบเท่ากัน จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการหักล้างกันขึ้น ดังนั้นจึงไม่ปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากระนาบต่างๆของผงผลึกบางค่าออกมา ในขณะที่ KBr จะมีจำนวนอิเล็กตรอนของไอออนของธาตุ K^+ และไอออนของธาตุ Br^- ไม่เท่ากัน ดังนั้นค่า $f_j(K^+)$ จะมีค่าแตกต่างจาก $f_j(Br^-)$ จึงไม่เกิดการหักล้างกันขึ้น ดังนั้นจึงปรากฏพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทุกพีคทั้งหมดออกมาจากระนาบต่าง ๆ ของผงผลึก



รูปที่ 2.14 แสดงพีคความเข้มข้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากออกมาจากระนาบต่างๆ ผงผลึก

ก. KCI

ข. KBr

ในทางปฏิบัติในปัจจุบันเมื่อได้พีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้ออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกเราจะนำมาเปรียบเทียบกับตารางไฟล์มาตรฐานของโครงสร้างผลึกของสารชนิดต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ต่อไปนี้ว่าสารนั้นมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้สมการที่ (2.2) นั้น จะใช้ในกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึกที่ยังไม่เคยมีใครทราบมาก่อน (unknown) ซึ่งมักต้องทำจากผลึกที่เป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก [8,9,11]

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{2.6}$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.2 ลงในสมการที่ (2.1) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin\theta}{\left(h^2 + k^2 + l^2\right)} \tag{2.7}$$

โดยที่ a = ค่าคงที่ของโครงผลึก

2.7.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮ็กซะโกนอล [8,9,11]

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮ็กซะโกนอล โดยมีค่าต่าง ๆ $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3}\left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2}\right) + \frac{l^2}{c^2} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

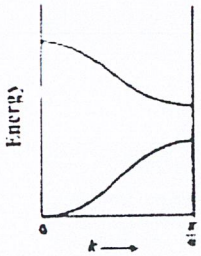
บทที่3
สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ที่จะทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และจะกล่าวถึงการดูดกลืนแสง ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของการดูดกลืนแสง การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorbtion coefficient)ของสารกึ่งตัวนำ และการคำนวณขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap)

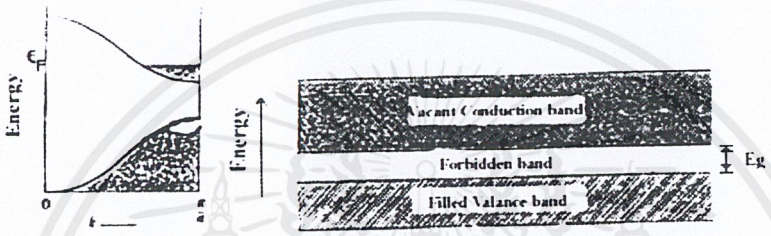
3.1 การเกิดสีของผลึก [8,9]

โดยทั่วไปมักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานในการแบ่งแยกชนิดของสารต่างๆที่เป็นอินทรินสิก(intrinsic)ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำหรือตัวนำ เป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์(valence band) และแถบนำ(conduction band) ซึ่งในแถบวาเลนซ์ สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและยังมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำ (conduction band) ซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำจะอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณต้องห้าม (forbidden region หรือ forbidden gap หรือ forbidden band) ซึ่งจะเรียกขนาดความกว้างของช่องว่างนั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:E_g) ขนาดของ E_g จะถูกนำมาใช้แบ่งแยกสารชนิดต่างๆนั่นเอง เช่น ฉนวนจะมี E_g>3eV สารกึ่งตัวนำจะมี E_g<3eV และตัวนำไม่มี ค่า E_g เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่าขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั่นเอง

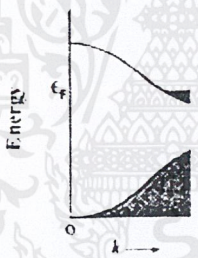
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบง่ายของสารชนิดต่างๆที่เป็นอินทรินสิก

ก. ฉนวน

ข. สารกึ่งตัวนำ

ค. ตัวนำ

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของสารตลอดจนการมีสีของผลึกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อให้พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $E_g(\hbar\omega \leq E_g)$ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน(transmitted)ออกมาจากผลึก ทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่า E_g = 2.42eV อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงินหรือสีเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเท่ากับสีเหลืองออกมาทั้งหมด และเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับย่านแสงสีเหลืองส้ม เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น ด้วยเหตุนี้ถ้าพิจารณาให้ฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีความหนา d เมื่อฉายแสงตกกระทบฟิล์มบางของสารตัวอย่างมีขนาดของความเข้มแสงเท่ากับ I_i แล้ววัดขนาดของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบางของสารตัวอย่างเป็น I_t ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ต่อจากนั้นเราจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient : α) ได้จากสมการ (3.1) และสามารถหาค่า E_g ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับพลังงานโฟตอนได้ นอกจากนี้เรายังสามารถทราบถึงชนิดของลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานด้วย ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันมากดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

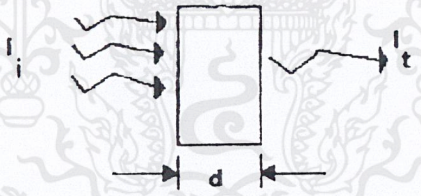
$$I_t = I_i e^{-\alpha d} \qquad (3.1)$$

เมื่อ I_t = ปริมาณของความเข้มแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง

I_i = ปริมาณของความเข้มแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d = ความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพแสดงการส่งผ่านของแสงในฟิล์มบางของสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d

นอกจากนี้การทำให้ผลึกมีสียังสามารถทำได้อีกหลายวิธีทั้งนี้จะต้องอาศัยหลักการพื้นฐานดังที่กล่าวมาข้างต้น คือการสร้างสถานะพ้นฐานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีของผลึก (color centers) ขึ้นมาภายในช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง ได้แก่

1. การเจืออะตอมของธาตุบางชนิดเข้าไปในผลึก เช่น ผลึก Al_2O_3 เป็นผลึกไม่มีสี เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Cr^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีแดงเข้มหรือที่เราเรียกว่า ทับทิม(Ruby) แต่เมื่อเจือด้วยอะตอมของธาตุ Ti เพียง 0.5% ไอออน Ti^{3+} จะเข้าไปแทนที่ไอออน Al^{3+} ทำให้เกิดศูนย์กลางการเกิดสีจึงทำให้ผลึกที่ได้มีสีน้ำเงินหรือที่เราเรียกว่า แซฟไฟล์ ได้แก่ นิล มรกต บุษราคัม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบอมบาดด์ด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา รังสีอัลตราไวโอเลต จะทำให้เกิดสถานะพลังงานที่เป็นกับดัก (trap state) ของอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสี

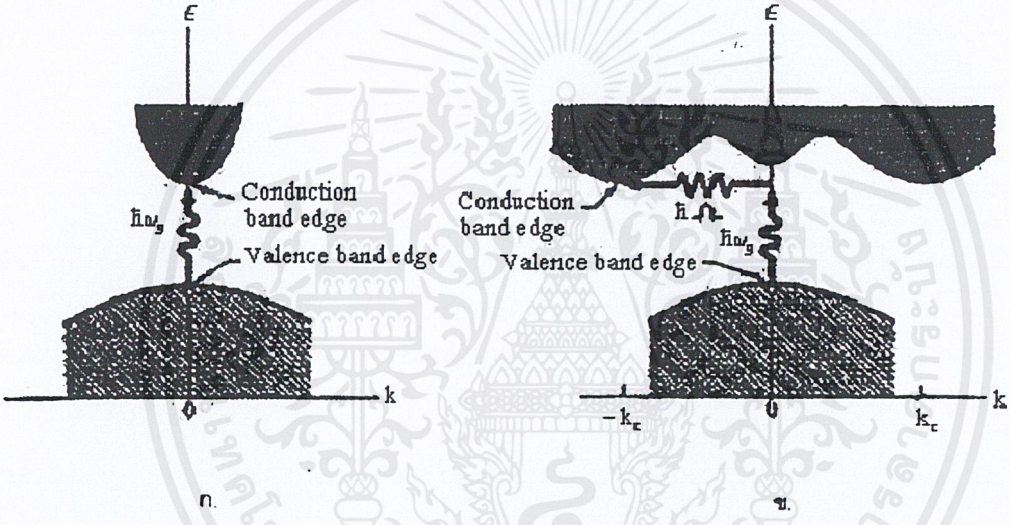
3. การทำให้เกิดการตกตะกอนสะสมของโลหะที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมากขึ้นบนผิวหน้าของผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเกิดสีขึ้น กล่าวคือ เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดการกระเจิงกับอนุภาคเหล่านั้น จึงทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีได้

3.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอน [8,9]

กระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่สุดคือ กระบวกการซึ่งทำให้เกิดทรานซิชัน (transition) โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมี 2 แบบ คือ แบบตรง(direct band gap) และแบบเฉียง(indirect band gap) ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่น(wave vector : k) ค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน(transition)จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดสูงสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน(phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน(absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือโครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีที่มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน หรือมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน(emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มี เวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ(E_{vert}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงดังรูปที่ 3.4(ข) ส่วนกระบวนการทำลายล้างโฟนอนมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งโครงผลึกจะดูดกลืนพลังงานความร้อนแล้วอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิดการสั่น และสร้างโฟนอนขึ้นมา ดังนั้นอิเล็กตรอนจะดูดกลืนโฟนอนแล้วตามด้วยกระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนมีค่าเท่ากับ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระต่อไป

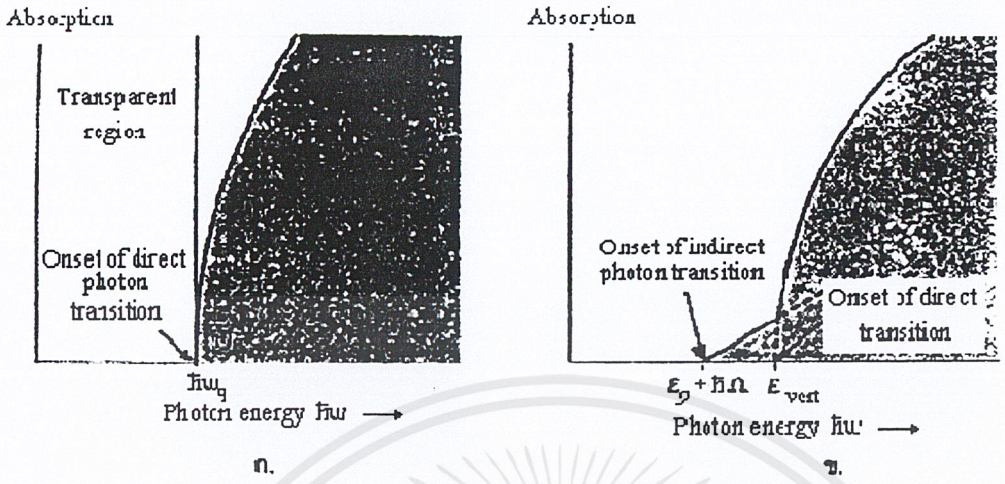


รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์(T = 0K)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์(T = 0K)

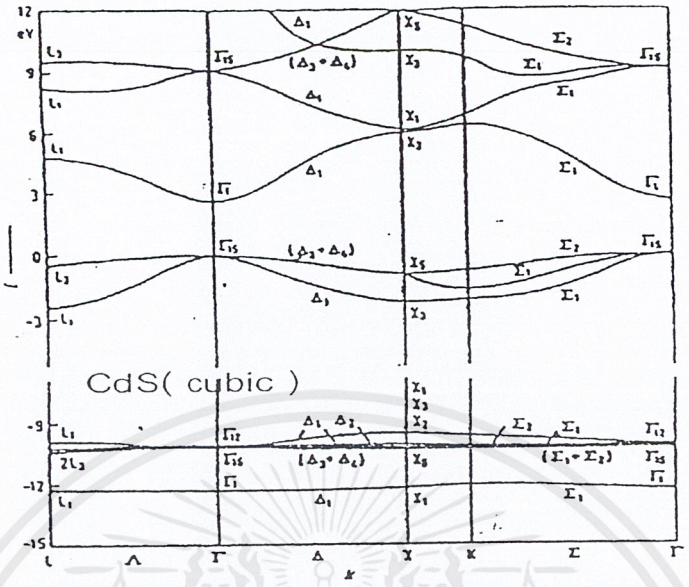
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

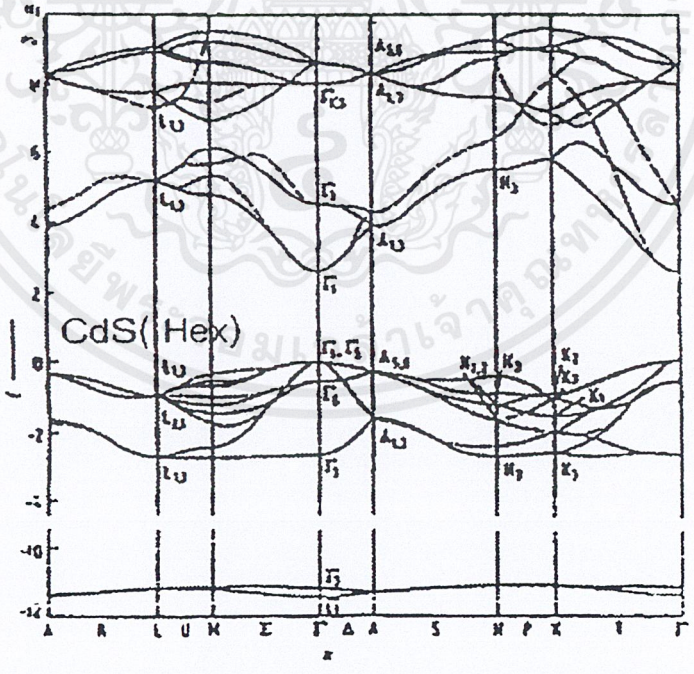
3.3 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [9,12]

CdS มีลักษณะโครงสร้างพลังงานแบบตรง คือ มีการย้าย(transition) สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์ค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และแบบเวิร์ทไซท์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.50 และ 2.501 eV ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิท(spin-orbit coupling)



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิท(spin-orbit coupling)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [12,13]

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปในตัวกลางที่มีค่าสภาพซึมซาบของแม่เหล็ก(μ)=1 จะได้สมการคลื่นเป็น

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

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

โดยที่ E คือสนามไฟฟ้าที่มีแอมปลิจูด E_0

H คือสนามแม่เหล็กที่มีแอมปลิจูด H_0

$k = k_1 + ik_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น

โดยที่ k_1 คือเวกเตอร์จริง และ k_2 คือเวกเตอร์จินตภาพ

หรือ $k \cdot k = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \omega^2 = \varepsilon \omega^2 / c^2$ โดยที่

ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

c คือค่าความเร็วแสง

ω คือความถี่เชิงมุม

t คือเวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากอากาศ เนื่องจากแสงจะได้รับ อิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางมีผลทำให้ความเร็วคลื่น ความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากดัชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - ik \quad (3.4)$$

โดยที่ n = ดัชนีหักเหจริง

k = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย(extrinction coefficient)

สำหรับระนาบคลื่นเอกพันธ์จะได้ว่า

$$|k_1| = n\omega/c$$

และ $$|k_2| = k\omega/c \quad (3.5)$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.1) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง x เป็น

$$E_x = E_{0x} \exp[i\omega(n\pi/c - t)] \exp(-\omega kx/c) \quad (3.6)$$

E_x คือ สนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_{0x} คือ สนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุด

จากสมการที่ (3.5) แสดงถึงคลื่นแสงผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\omega kx/c)$ และความเข้มข้นของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I \alpha EE^{*} \qquad (3.7)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \alpha E_0^{2} \exp(-2\pi kx/c)$$

หรือ

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

$$I = I_0 \exp(\alpha x) \qquad (3.8)$$

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

I คือ ความเข้มแสงที่ตำแหน่ง x

I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบ(W/cm^2)

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสูญญากาศ

จากสมการที่ (3.7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{I}\left(\frac{dI}{dx}\right) \qquad (3.9)$$

สมการที่ (3.8) คือ อัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง

3.5 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ CdS [9,12,13]

สารกึ่งตัวนำCdSมีลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงนั่นคือมีการย้าย (transition) สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์คลื่น (wave vector : k) ค่าเดียวกัน โดยการย้ายสถานะแบบนี้ แบ่งได้อีก 2 แบบ คือ การย้ายสถานะแบบยินยอม (allowed transition) และแบบต้องห้าม (forbidden transition) ซึ่งค่าทั้งสองแบบนี้จะขึ้นกับค่าออปติคอล เมตริก อิลิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ กล่าวคือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม ซึ่งจากแถบพลังงานที่มีรูปร่างเป็นพาราโบลาจะสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเนื่องจากการย้ายสถานะแบบยินยอม และแบบต้องห้ามได้ โดย

การเปลี่ยนสถานะแบบยินยอม

$$(\alpha h\nu) = 2c\hbar/n(2\mu/\hbar^2)^{3/2}\left|H_{c\nu}(0)\right|^2(h\nu - E_g)^{1/2}$$

$$= A(h\nu - E_g)^{1/2} \qquad (3.10)$$

การเปลี่ยนสถานะแบบต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = 2c\hbar/n(2\mu/\hbar^2)^{5/2}\left|H_{c\nu}(K)\right|_{K=0}^{2}(h\nu - E_g)^{3/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{3/2} \qquad (3.11)$$

โดยที่ μ คือ มวลลดทอนของอิเล็กตรอน-โฮล (the reduced electron-hole mass)

$H_{c\nu}$ คือ ออปติคอล เมตริก อิลิเมนต์ (the optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำ

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

3.6 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [8,12,13]

สำหรับในการทดลองของเราสามารถจะหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง(transmission : %T) ผ่านสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบ(I_i) บนสารตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d และแสงที่ส่งผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง(I_t) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น(λ) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการ ดังนี้

$$T = I_t/I_i = (1 - R)^2 e^{-\alpha d}/(1 + R^2 e^{-2\alpha d}) \qquad (3.12)$$

$$R = I_r/I_i = [(n - 1)^2 + k^2]/(n + 1)^2 + k^2 \qquad (3.13)$$

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

α คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง

I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่าน

I_i คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อน

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

n คือ ดัชนีหักเห

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extrinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่างมีความหนามากพอที่ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการ (3.12)จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = I_t/I_i = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \qquad (3.14)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1 - R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการที่ (3.14) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \ln(I_r/I_t) \qquad (3.15)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (3.15) ยังมีผลของความเข้มแสงที่สะท้อนเข้าเกี่ยวข้องด้วยจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นแสง(α_0)ที่เกิดจากการบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำเท่านั้น เพื่อให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติเราจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (3.1) และเราสามารถหาค่า E_g ได้จากสมการที่ (3.10) หรือ (3.11) หรือทำได้โดยการลากเส้นโดยประมาณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α^2 กับ $h\nu$ ตรงส่วนของกราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นมาตัดกับแกนพลังงานโฟตอน($h\nu$) จุดตัดกราฟจะเป็นค่า E_g นั่นเอง และลักษณะของกราฟจะแสดงให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงหรือแบบเฉียง ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก),(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
สมบัติทางไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยจะเริ่มจากการอธิบายสภาพนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้า และการวัดสภาพต้านไฟฟ้าแบบต่างๆ ซึ่งพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้ ระดับพลังงานผู้รับ และศูนย์กลางการรวมตัว (recombination centers) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำ จะขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

4.1 สภาพนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [8,9,14,15]

สารกึ่งตัวนำมีประจุพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบนำ

เมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนย้าย (drift) ไปในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า และทำให้เกิดกระแสพัดพาขึ้น



รูปที่ 4.1 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้า

ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน(electron mobility) μ_e ดังนั้นจะได้ว่า

$$v_{drift} = \mu_e E \qquad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ v_{drift} คือความเร็วลอยเลื่อน(drift velocity)ของอิเล็กตรอน

μ_e คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอน

E คือสนามไฟฟ้า

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน J_c หาได้โดย

$$J_c = nev_{drift} \tag{4.2}$$

หรือ

$$J_c = ne\mu_c\xi \tag{4.3}$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

e คือประจุของอิเล็กตรอน

v_{drift} คือความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์มสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$\sigma = J/E \tag{4.4}$$

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ คือ

$$\sigma = ne\mu_n + np\mu_p \tag{4.5}$$

เมื่อ μ_n และ μ_p คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

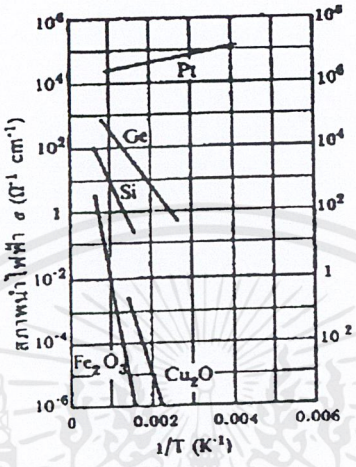
และสภาพนำไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์กับสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) โดย $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าไปตามสมการ

$$\rho = 1/e(n\mu_n + p\mu_p) \tag{4.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้า [2,8,9,14,15]

คุณสมบัติเฉพาะตัวอย่างหนึ่งของสารกึ่งตัวนำ คือ การขึ้นกับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แสดงการขึ้นกับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ

รูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า (σ) ในสเกล ln และค่าส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (1/T) จากรูปนี้สิ่งที่เราทราบคือ

1. กรณีโลหะ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะลดลง (สภาพต้านทานจะเพิ่มขึ้น)
2. กรณีสารกึ่งตัวนำ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น สภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น(สภาพต้านทานจะลดลง) และการเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้าก็มีความชันมากขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.2 นี้ เราจะได้สูตรสภาพนำไฟฟ้าจากการทดลองว่า

$$\sigma = Ae^{-B/T} \qquad (4.7)$$

เมื่อ B คือ พลังงานกระตุ้น

A คือ ค่าคงที่

T คือ อุณหภูมิ (K)

4.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [9,16]

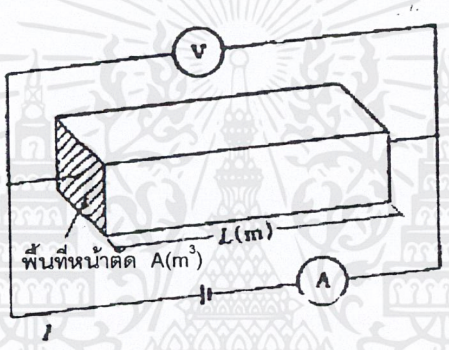
วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

4.3.1 วิธีวัดโดยตรง (direct method) [9,16]

สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า สามารถวัดได้โดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแท่งสารกึ่งตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตร ยาว l เมตร กระแสไฟฟ้าวัดได้ I แอมแปร์ และความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมแท่งสารกึ่งตัวนำดังรูปมีค่า V โวลต์ บริเวณแรเงาเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิก



รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า

จาก $$J = \sigma E$$

และ $$J = I / A$$

และ $$E = V / l$$

ดังนั้น $$\sigma = \frac{Il}{AV} \qquad (\Omega - m)^{-1} \qquad (4.8)$$

ซึ่งค่าต่างๆทางด้านขวาของสมการเป็นค่าที่วัดได้จากการทดลองทั้งสิ้น ส่วนสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเป็นส่วนกลับ นั่นคือ

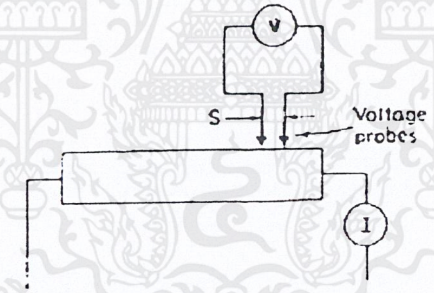
$$\rho = \frac{AV}{Il} = \frac{RA}{l} \qquad (\Omega - m) \qquad (4.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาความต้านทานของรอยต่อ(contact resistance) ระหว่างสารกึ่งตัวนำกับขั้วที่สัมผัสด้วย ซึ่งเราสามารถลดผลของความต้านทานที่รอยต่อได้โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า จะพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อยๆลดลงในขณะที่ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะคงที่ นี่คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แท้จริง

4.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (two point probe method) [9,16]

วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งของสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่างๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อโลหะ(ที่ทำขั้วไฟฟ้า)กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อได้ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป และโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง(high impedance) ดังรูปที่ 4.4

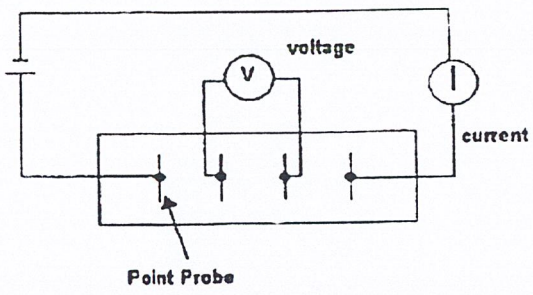


รูปที่ 4.4 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีปลายแหลมสองขั้ว

4.3.3 วิธีการวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four-point probe method) [9,16]

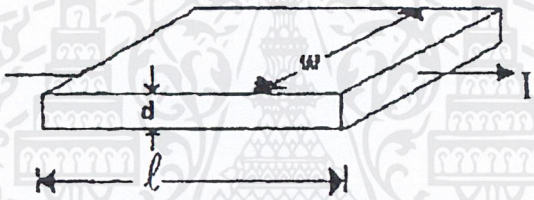
การวัดจะใช้ขั้วสัมผัสสี่ขั้วเรียงกันอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วสัมผัสคู่นอก ส่วนคู่สัมผัสคู่ในวัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูปที่ 4.6 จากฎของโอห์ม จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานฟิล์มได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wd} \qquad (4.10)$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม (l=w) ดังนั้นสมการที่ 4.10 เขียนได้ใหม่เป็น

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

R_s คือความต้านทานแผ่น (sheet resistance) , ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า

แต่ถ้า $l \neq w$ จะได้ว่า

$$R_s = R(W/l) \qquad (4.11)$$

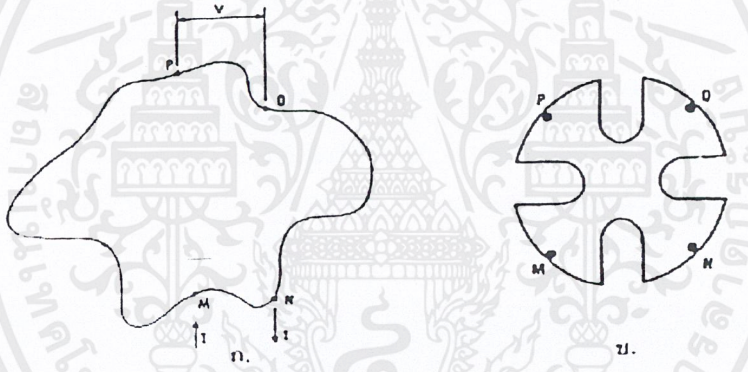
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ [9,16]

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์นั้นจะให้ค่าที่ถูกต้องโดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์
ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง
ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

จากรูปที่ 4.7 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า I_{MN} ผ่านเข้าทางจุด M และออกทางจุด N เราสามารถที่จะวัดความต่างศักย์ $V_{PO} = V_P - V_O$ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_p - V_o}{I_{MN}} \qquad (4.12)$$

ถ้าเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกทางจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการ (4.12) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{ON,PM} = \frac{V_M - V_o}{I_{NO}} \tag{4.13}$$

ทั้งสมการที่ (4.12) และ (4.13) จะปรากฏในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

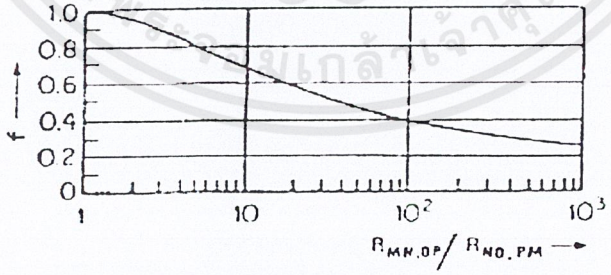
$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{NO,PM}\right) = 1 \tag{4.14}$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสาร

สมการที่ (4.14) สามารถเปลี่ยนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2}\left(\frac{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}}{2}\right) f\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right) \tag{4. 15}$$

โดยที่ f เป็นฟังก์ชันของ[$R_{MN,OP}$/ $R_{NO,PM}$] เรียกว่าแฟกเตอร์ค่าแก้(correcting factor) ดังปรากฏอยู่ในรูปที่ 4.8 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำหาได้ง่ายจากสมการ (4.15)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการง่ายๆแล้วการวัดความนำไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ อาจทำได้โดยการวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำ และวัดค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ แล้วนำค่าที่วัดได้นี้มาคำนวณหาความนำไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำนี้ได้ แต่โดยความเป็นจริงในทางปฏิบัติแล้ว การวัดดังกล่าวนั้นทำได้ไม่ง่ายนัก เพราะจุดปลายของแท่งสารกึ่งตัวนำนั้นจะต้องเป็นจุดสัมผัสโอห์มมิกที่สม่ำเสมอ และเป็นการไม่สะดวกนักที่จะต้องสร้างจุดสัมผัสทุกๆครั้งที่จะวัดความนำไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำใดๆ รวมทั้งการกำหนดขนาดของแท่งนั้นด้วย ด้วยปัญหาดังกล่าวนี้เองวิธีการวัดหาค่าความนำไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นจึงเป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากทำการทดลองและวัดได้ง่าย สามารถวัดได้ทุกขนาดของแท่งสาร ดังนั้นโครงงานพิเศษนี้จึงเลือกทำการวัดความต้านทานแผ่นด้วยวิธีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การเตรียมฟิล์มบาง CdS จากสารละลายโดยวิธีทางเคมี-แสง (PCD)

5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา [3-6]

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สามารถเตรียมได้จากสารละลายโดยวิธีทางเคมี-แสง โดย CdS จะถูกเคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นแก้วที่อยู่ในสารละลายที่ประกอบด้วย $S_2O_3^{2-}$ และ Cd^{2+} ซึ่ง $S_2O_3^{2-}$ จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 300nm ค่า pH ของสารละลายมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 3-8 เมื่อใส่ H_2SO_4 เข้าไป แผ่นรองรับจะวางในสารละลาย โดยมีความลึก 5mm และแสงอัลตราไวโอเลตจากหลอดไฟที่บรรจุไอปรอท (mercury lamp) จะถูกฉายผ่านเลนส์นูน ซึ่งบริเวณที่ถูกฉายแสงประมาณ 10mm โดยใช้เวลาเคลือบ 1 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิการเคลือบจะเพิ่มขึ้นช้าๆ แต่ไม่ควรเกิน 30°C ซึ่งจากการเกิดแสงกระตุ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) รีดักชัน (reduction) ในสารละลาย และบริเวณที่ฉายแสงจะเกิดเป็นฟิล์มบาง CdS

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสารละลาย

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด CdS

$$Cd^{2+} + S + 2e^- = CdS \qquad \text{----------(5.1)}$$

ก่อนการฉายแสง S จะถูกปลดปล่อยจาก $S_2O_3^{2-}$ ในสารละลายกรด ตามปฏิกิริยา

$$2H^+ + S_2O_3^{2-} = S + H_2SO_3 \qquad \text{----------(5.2)}$$

และเมื่อฉายแสง กระบวนการนี้จะดำเนินไปในสารละลายที่มีค่า PH $\geq$ 7 ดังนั้น $S_2O_3^{2-}$ ไอออนจะหลุดออกมาเมื่อฉายแสง

$$S_2O_3^{2-} + h\nu = S + SO_3^{2-} \qquad \text{----------(5.3)}$$

และเมื่อ S รวมตัวกับ $Cd^{2+} + 2e^-$ จะเกิดเป็นโมเลกุลของสารประกอบ CdS ขึ้นมา

$S_2O_3^{2-}$ ไอออนจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน นั่นคือเป็นตัวให้ $S_4O_3^{2-}$ กับ $S_3O_6^{2-}$ ไอออน ดังนั้นเราสามารถพิจารณาว่า $S_2O_3^{2-}$ ไอออนจะให้อิเล็กตรอน ตามปฏิกิริยา

$$2S_2O_3^{2-} + h\nu = S_4O_6^{2-} + 2e^- \qquad \text{----------(5.4)}$$

$$SO_3^{2-} + S_2O_3^{2-} + h\nu = S_3O_6^{2-} + 2e^- \qquad \text{----------(5.5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ [3-6]

จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยแสงจะก่อให้เกิดโมเลกุลของสารประกอบ CdS ในสารละลาย โดยที่ Cd 1อะตอมจะมีพันธะแบบเตตระฮีดรอลกับ S จำนวน 4อะตอม ซึ่งแขน S ตัวหนึ่งจะหลุดออกไป เพื่อไปยึดเกาะกับกระจกบริเวณตำแหน่งก่อเกิด (nucleation sites) ซึ่งกระจกจะมีขนาดของตำแหน่งก่อเกิดที่เหมาะสม จึงทำให้เกิดการเคลือบขึ้นเป็นชั้นฟิล์มบนฐานรองกระจก

5.3 การทบทวนผลงานที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว [3,6]

การเตรียมด้วยวิธี PCD มีสารตั้งต้นประกอบด้วย $CdSO_4$ เข้มข้น 2.0×10^{-3} M และ $Na_2S_2O_3$ เข้มข้น 1.0×10^{-1} M ทำการปรับ pH จาก 3.0-8.0 โดยการเติม H_2SO_4 ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมมีค่า 3.5 สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการเคลือบประมาณ 1 ชั่วโมง โดยอุณหภูมิของการเคลือบจะเพิ่มขึ้นช้าๆระหว่างเคลือบ ซึ่งไม่ควรเกิน 30°C ฟิล์มบางที่ได้เป็นผลึกหลายรูป (polycrystalline) และมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และจะนำ CdS มาแอนนีลที่อุณหภูมิ300-500 °C นาน 30 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นต้น ซึ่งขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้เคลือบ โดยมีความหนาประมาณ 1 μm ช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดเท่ากับ 2.42 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

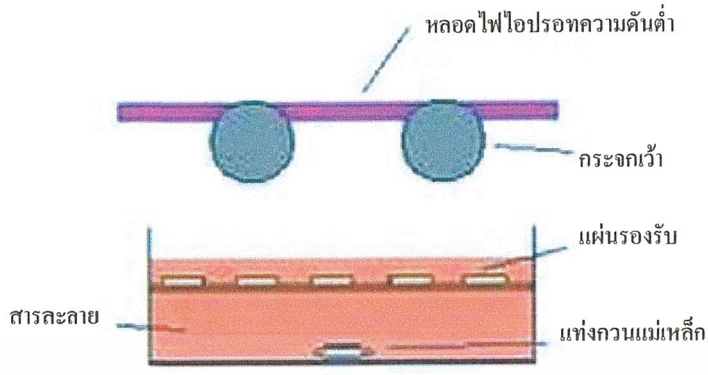
บทที่6
วิธีการทดลองและผลการทดลอง

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยวิธีการเคลือบด้วยวิธีเคมี-แสง (photochemical deposition : PCD) โดยศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ทั้งกรณีไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาการส่งผ่านของแสงเพื่อนำไปศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบาง และคำนวนหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) นอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น และวัดความหนาของฟิล์มบาง

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

สำหรับวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีเคมี-แสง จัดวางแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นรองรับ (substrate) ให้อยู่ในแนวนอน โดยวางบนแผ่นพลาสติกที่ทนต่อสภาพความเป็นกรดของสารเคมีที่จัดเตรียมไว้ แล้ววางในภาชนะพลาสติกที่ทนต่อความเป็นกรดของสารเคมี โดยแสงจะมาจากหลอดไฟที่บรรจุไอปรอทความดันต่ำ (low presure mercury lamp) ที่ให้แสงในช่วงอัลตราไวโอเลต โดยมีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร [4] ซึ่งจะใช้กระจกเว้าเป็นตัวรวมแสงให้ตกกระทบบนแผ่นกระจกสไลด์ นอกจากนี้จะใช้ตัวกวนสารละลาย (magnetic stirrer) เพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ เป็นไปตามรูปที่ 6.1 ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์จะถูกเทลงในภาชนะนั้น โดยปริมาณสารตั้งต้นเป็นไปตามตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



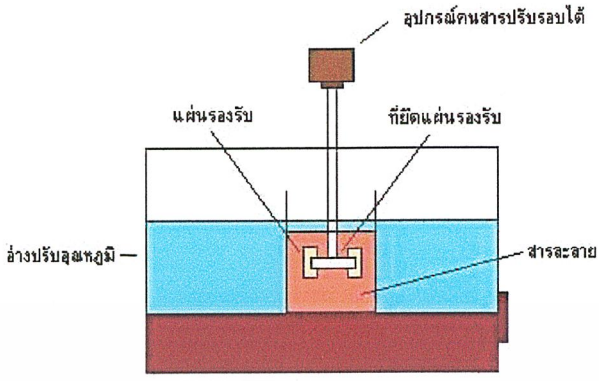
รูปที่6.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีเคมี-แสง

ตารางที่6.1 แสดงปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมCdS ด้วยวิธีเคมี-แสง ในบีกเกอร์ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 400 มิลลิลิตร

สารตั้งต้น	ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)
$CdSO_4.8/3H_2O$	0.07641
$Na_2S_2O_3$	3.72087

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยการอาบสารละลายเคมีบนกระจกสไลด์ ซึ่งจะใช้เป็นแผ่นรองรับ (substrate) เพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธีเคมี-แสง จะใช้แท่นยึดแผ่นรองรับทำด้วย เทฟลอน (taflon) ซึ่งเซาะร่องไว้ประมาณ 20 ร่อง สำหรับแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้ง แท่งเทฟลอนจะถูกยึดกับแท่งแก้วตันต่อเชื่อมกับมอเตอร์ซึ่งจะทำให้แท่งแก้วตันหมุนขณะที่เคลือบฟิล์มบางในอัตราเร็วคงที่ประมาณ60รอบต่อนาที อ่างน้ำ(bath)ที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ถึง100 °C แสดงดังรูป 6.2 และยังใช้เครื่องมืออัลตราโซนิกมาช่วยกำจัดตะกอนเพื่อไม่ให้ติดบนฟิล์มที่ได้จากการเคลือบแล้ว ปริมาณสารตั้งต้นต่างๆในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ถูกเทลงในบีกเกอร์ที่เติมน้ำปลอดประจุ จนมีปริมาตรของสารละลายทั้งหมด 150 มิลลิลิตร แสดงค่าดังตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่เตรียมฟิล์มบางCdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี

ตารางที่6.2 แสดงปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมCdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี

สารตั้งต้น	ปริมาณสารตั้งต้น
$CdSO_4.8/3H_2O$	0.38456 g
$SC(NH_2)_2$	0.57062 g
NH_3 (25%)	16.8 ml

6.2 การเตรียมแผ่นรองรับ [9]

แผ่นรองรับที่ใช้เตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ จะใช้กระจกสไลด์ขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร ความยาว 25 มิลลิเมตร ทำความสะอาดอย่างดี ตามขั้นตอนดังนี้

การเตรียมกระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับสำหรับเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธี PCD

1. นำกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน และล้างด้วยน้ำสะอาด
2. นำกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วไปล้างด้วย ไตรคลอโรเอททีลีน (TCE) เพื่อขจัดคราบไขมัน , อะซิโตนเพื่อขจัดTCE , เอธานอลเพื่อขจัดอะซิโตน ตามลำดับ
3. แช่กระจกสไลด์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ในสารละลายกรด HF 50% เข้มข้น เป็นเวลา 10นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำปลอดประจุ
4. นำกระจกสไลด์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 10 นาที 3 รอบ
5. นำกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่อุณหภูมิ 95 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที จะได้กระจกที่สะอาดพร้อมนำมาใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธี CBD จะมีขั้นตอนการทำความสะอาดดังนี้

1. ทำเช่นเดียวกับวิธี PCD ในขั้นตอนที่ 1 และ 2
2. แช่กระจกสไลด์ในสารละลายกรดHF ปริมาณ 5 มิลลิลิตร กับน้ำปลอดประจุ 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที
3. ทำตามวิธี PCD ในขั้นตอนที่ 4 และ 5 จะได้กระจกที่สะอาด พร้อมนำมาใช้งาน

6.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

6.3.1 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยวิธี CBD [9,17,18]

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ประกอบด้วย $CdSO_4.8/3H_2O$, $SC(NH_2)_2$ และ NH_3 ความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 1.67 โมลาร์ ตามลำดับ นำสารตั้งต้นทั้งหมดมาละลายในน้ำปลอดประจุที่อยู่ในบีกเกอร์ ปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ150 มิลลิลิตร ในโครงงานพิเศษนี้ได้เลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นประกอบด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต($CdSO_4.8/3H_2O$),ไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) และแอมโมเนีย (NH_3) ที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีตามที่แสดงในตารางที่6.1
2. ตั้งอุณหภูมิอ่างน้ำ ให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 80 $^{\circ}C$ และจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่6.2
3. นำบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุ 100 มิลลิลิตร วางลงในอ่างน้ำ
4. นำแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกสไลด์ที่ติดอยู่กับแท่นยึดที่ทำจากเทฟลอนใส่ลงในบีกเกอร์ โดยเชื่อมกับมอเตอร์ปรับอัตราเร็วให้คงที่ ประมาณ 60 รอบต่อนาที
5. ละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟต และไทโอยูเรียกับน้ำปลอดประจุเข้าด้วยกันในขวดชมพู่
6. ใส่แอมโมเนียปริมาตร 16.8 มิลลิลิตรในขวดชมพู่ พร้อมเติมน้ำปลอดประจุ ให้มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายทั้งหมดในขวดชมพู่เทใส่บีกเกอร์ที่เตรียมไว้ในอ่างน้ำ สารละลายในบีกเกอร์จะมีปริมาตรรวม 150 มิลลิลิตร
8. ทำการวัดค่า pH และทำการปล่อยทิ้งไว้ประมาณ60นาที โดยควบคุมอัตราการหมุน และอุณหภูมิของอ่างน้ำให้คงที่
9. หลังจากผ่านไป 60นาที จะปรากฏฟิล์มบางเคลือบบนกระจกสไลด์ และปรากฏอนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์บางส่วนจับเป็นก้อนเล็กๆคล้ายผงฝุ่นบนผิวหน้าฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. นำแท่งเทฟลอนที่มีแผ่นรองรับไปเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก โดยใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำปลอดประจุ ใช้เวลา 15นาที เปลี่ยนน้ำและเขย่าอีก 20นาที
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบซ้ำอีกครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-10
12. นำฟิล์มบางที่เคลือบ2ครั้งมาเป่าแห้งโดยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์
13. เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่1-12 ให้ได้ประมาณ 200 ตัวอย่างเพื่อยืนยันผลการทดลอง
14. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ500°C ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศ ความดัน0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที
15. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ยี่ห้อBrucker D8 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน CuK_{α} มีค่าเท่ากับ 1.5418 A° ความต่างศักย์40kV และกระแสไฟฟ้า40mA
16. นำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงแสง โดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลแบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV/visible spectrometer JUSCO 7600) และใช้ความยาวคลื่นในช่วง 300-1100nm เพื่อศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านของแสง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
17. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น โดยใช้แรงดัน 0-30V ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดไฟฮาร์โลเจน(ELH) และหลอดไฟไอปรอทความดันสูง และไม่มีการฉายแสง เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง
18. นำฟิล์มบางที่ได้ไปวัดความหนาของฟิล์ม โดยใช้เครื่อง surface profiler ยี่ห้อ Dektak^{3}ST โดยจะมี 3กรณี คือ กรณีฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธี CBD, กรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีเคมี-แสง บนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี และกรณีที่ฟิล์มบางเตรียมด้วยวิธีPCD

6.3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD [5,6,7]

สารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ประกอบด้วย $CdSO_4.8/3H_2O$, $Na_2S_2O_3$ มีความเข้มข้น $2x10^{-3}$ โมลาร์ และ0.1โมลาร์ ตามลำดับ โดยเตรียมด้วยเงื่อนไขที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้ฟิลม์บางที่มีคุณภาพ โดยขั้นตอนเป็นดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นประกอบด้วยเกลือแคดเมียมซัลเฟต และโซเดียมไทโอซัลเฟต ตามสัดส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จัดเตรียมอุปกรณ์ ดังรูปที่ 6.1
3. นำสารตั้งต้นทั้งหมดเทลงในภาชนะเตรียมสารที่สามารถทนต่อความเป็นกรดของสารเคมี นำกระจกสไลด์วางบนฐานรองที่ทำจากพลาสติกทนต่อความเป็นกรดของสารเคมีที่จัดเตรียมไว้ในแนวนอน โดยจะมีทั้งกระจกสไลด์ที่ใช้กัดด้วยกรดเข้มข้นและแผ่นรองรับ CBD-CdS ซึ่งเคลือบบนกระจกสไลด์ เทน้ำปลอดประจุให้ท่วมแผ่นพลาสติกทนต่อสภาพ ความเป็นกรดของสารเคมีที่ใช้วางแผ่นรองรับ
4. นำภาชนะดังกล่าวข้างต้นวางบนเครื่องกวนสารละลาย และปรับให้แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) หมุนด้วยอัตราเร็วคงที่
5. หยดกรดซัลฟูริกปริมาณ 3 หยด แล้ว pH มีค่าเท่ากับ 3.5 ปิดตู้และทำการเปิดสวิทซ์ของหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำ โดยต้องทำด้วยความรวดเร็ว
6. หลังจากผ่านไป 1 ชั่วโมง ปิดสวิทซ์หลอดไฟ นำแผ่นพลาสติกทนต่อสภาพความเป็นกรดของสารเคมีออกมาจากสารละลาย จะปรากฏฟิล์มบางเคลือบบนกระจกสไลด์และแผ่นรองรับ CBD-CdS
7. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเคลือบซ้ำอีก 5 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-6
8. นำฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบ 6 ครั้ง เขย่าตะกอนออกด้วยน้ำปลอดประจุ โดยใช้เครื่องอัลตร้าโซนิก แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
9. เตรียมฟิล์มบางตามขั้นตอนที่ 1-8 ให้ได้ประมาณ 400 ตัวอย่าง โดยได้ฟิล์มบางจากแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ประมาณ 200 ตัวอย่าง และจากแผ่นรองรับ CBD-CdS 200 ตัวอย่าง เพื่อยืนยันผลการทดลอง
10. นำฟิล์มที่เตรียมได้ไปทำการแอนนีล ที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 ,400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศ ความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที
11. นำฟิล์มบางมาหาคุณสมบัติต่างๆเชิงฟิสิกส์ เช่นเดียวกับวิธี CBD

6.4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

จากการสังเกตในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีเคลือบด้วยเคมี-แสงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อหยดกรดซัลฟูริกลงไปในภาชนะเตรียมสารที่สามารถทนสภาพความเป็นกรดของสารเคมีที่มีสารละลายของเกลือแคดเมียมซัลเฟต โซเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทโอซัลเฟต และน้ำปลอดประจุ โดยเมื่อหยดกรดซัลฟูริกแล้ว ต้องรีบฉายแสงโดยทันที เมื่อครบตามกำหนดเวลา คือประมาณ60นาที พบว่าสารละลายในภาชนะที่สามารถเตรียมสารจะมีสีเหลืองขุ่น เกิดตะกอนเป็นผงสีเหลืองลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ เมื่อนำฟิล์มออกมาจากสารละลายและเมื่อปล่อยให้ชิ้นสารแห้ง พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีลักษณะผิวหน้าที่ขรุขระ มีอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์เล็กๆจับตัวอยู่หน้าชิ้นสาร มีสีเหลืองขุ่น ไม่โปร่งแสง เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า เนื้อฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์จะมีอนุภาคเล็กๆสีเหลืองเคลือบบริเวณผิวหน้าไม่สม่ำเสมอ โดยถ้าบริเวณที่มีอนุภาคมาก สีของฟิล์มบริเวณนั้นจะมีสีเหลืองเข้ม ส่วนถ้าบริเวณที่มีอนุภาคน้อย สีของฟิล์มบางจะเป็นสีเหลืองอ่อน ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.3

รูปที่ 6.3 แสดงฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีPCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งกัดด้วยกรด HFเข้มข้น โดยเคลือบ 3 ครั้ง

แต่เนื่องจากคุณภาพของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธี PCDไม่ดีพอ หลุดร่อนได้ง่าย อาจมีสาเหตุมาจากตำแหน่งก่อเกิด (neucleation site) มีปริมาณน้อย ทำให้อะตอมของแคดเมียม และซัลเฟอร์ ไม่เกิดการรวมตัวและจับกับผิวหน้าของกระจกสไลด์ ดังนั้นจึงได้ทำการเตรียมแผ่นรองรับใหม่ โดยการเคลือบฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีอาบสารละลายเคมีบนกระจกสไลด์เพื่อทำหน้าที่เป็นแผ่นรองรับ (substrate) จากนั้นจึงเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีเคมี-แสงลงบนแผ่นรองรับนี้ แผ่นรองรับที่เป็นแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบCBDจำนวน 2 ครั้ง จะมีสีเหลืองส้ม ซึ่งแผ่นรองรับชนิดใหม่นี้จะเป็นแผ่นต้นแบบให้โมเลกุลของแคดเมียมซัลไฟด์เกาะฐานรองได้ดีขึ้น โดยจากการสังเกตฟิล์มบางที่ได้มาจากวิธีดังกล่าว พบว่า ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบขึ้น แต่ยังมีตะกอนแคดเมียมซัลไฟด์เป็นผงเล็กๆสีเหลืองอ่อนจับตัวอยู่บนผิวหน้า สีของฟิล์มบางที่ได้จะเห็นเป็นสีเหลือง โปร่งแสง ดังแสดงในรูปที่6.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

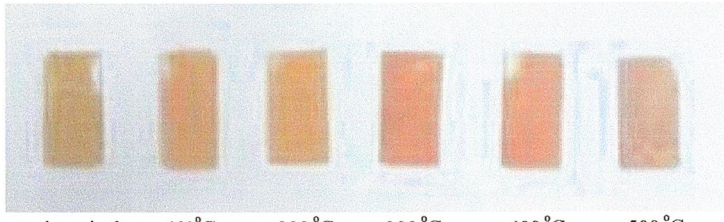


รูปที่6.4 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS โดยเคลือบ3ครั้ง

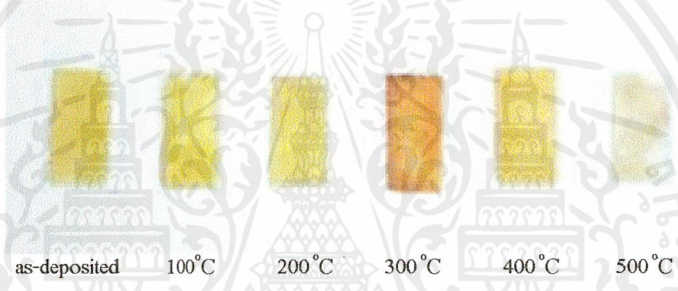
6.4.2 ฟิล์มบาง CdS เมื่อมีการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศต่างๆ

ฟิล์มบาง CdS เมื่อมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100,200,300,400และ500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา20นาที สำหรับการแอนนีลในบรรยากาศก๊าซ S_2 ทำโดยการใส่ธาตุ S ไว้บนภาชนะ แล้ววางไว้ตำแหน่งตรงกลางเตาทรงกระบอกยาว จากนั้นจึงตั้งอุณหภูมิให้ตรงกลางเตามีค่าเท่ากับ 550°C โดยอาศัยลักษณะโปไฟล์เตา เราจึงวางฟิล์มบางที่ต้องการแอนนีลไว้ที่ตำแหน่งที่อุณหภูมิเตาเป็น 500°C, 400 °C และ 300 °C ส่วนอุณหภูมิ 200 °C และ 100 °C อยู่ใกล้ปลายเตามากเกินไป ทำให้ไม่มีบริเวณมากพอที่จะวางฟิล์มบาง ในกรณีที่มีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธี PCD บนแผ่นรองรับ CBD-CdS พบว่า สีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเข้มจนเป็นสีส้มที่อุณหภูมิประมาณ 300°C และสีจะอ่อนลงเป็นสีส้มอ่อนจนเหลืองเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความเป็นมันวาวจะลดลง เนื่องจากอะตอมของซัลเฟอร์ระเหยจากผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยอะตอมของซัลเฟอร์ที่ระเหยไปคือซัลเฟอร์ที่ไม่มีพันธะกับแคดเมียม [6] และในกรณีที่เตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีเคมี-แสงอย่างเดียว พบว่าสีของฟิล์มบางจะเปลี่ยนจากเหลืองอ่อนเป็นเหลืองเข้มที่อุณหภูมิประมาณ300°C เช่นกัน และสีเหลืองจะอ่อนลงเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความเป็นมันวาวจะลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่6.5ถึงรูปที่6.12

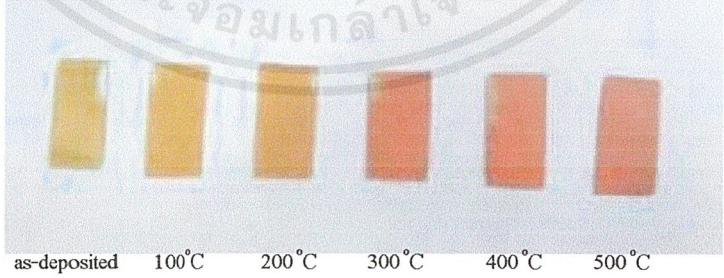
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.5 แสดงฟิล์มบาง PCD- CdS บนแผ่นรองรับ CBD- CdS ที่แอนนีลในอากาศ เป็นเวลา20นาที

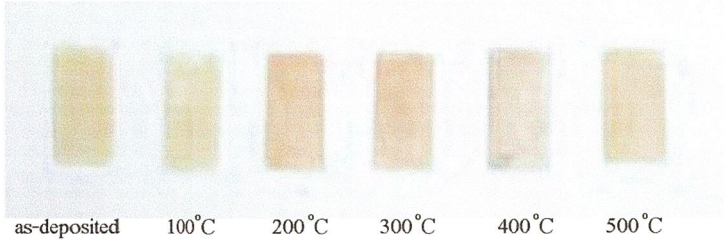


รูปที่6.6 แสดงฟิล์มบาง PCD- CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลในอากาศ เป็นเวลา20นาที

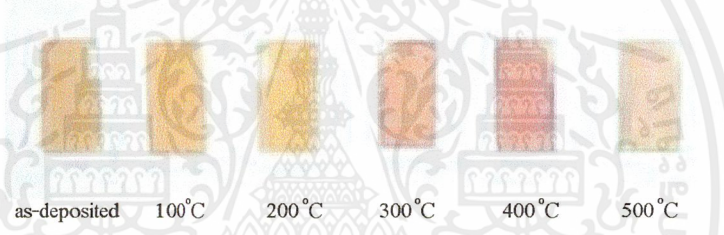


รูปที่6.7 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลภายใต้สูญญากาศ เป็นเวลา20นาที

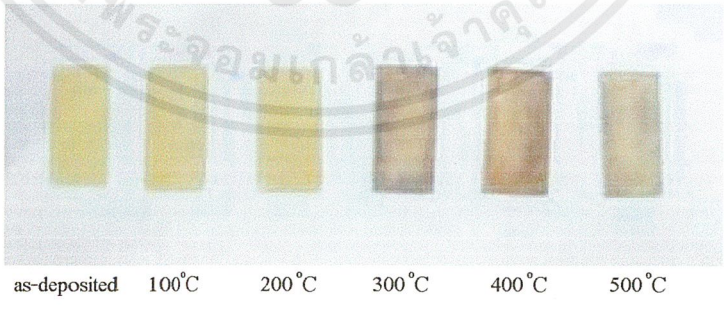
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.8 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่แอนนีลภายใต้สูญญากาศ เป็นเวลา20นาที

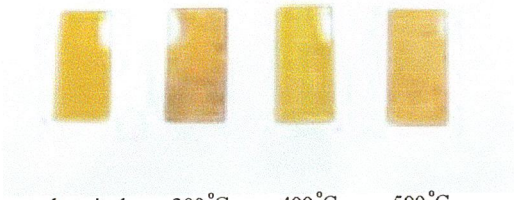


รูปที่6.9 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เป็นเวลา20นาที

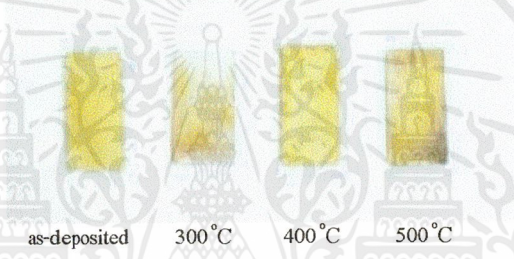


รูปที่6.10 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เป็นเวลา20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่6.11 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศซัลเฟอร์ เป็นเวลา20นาที



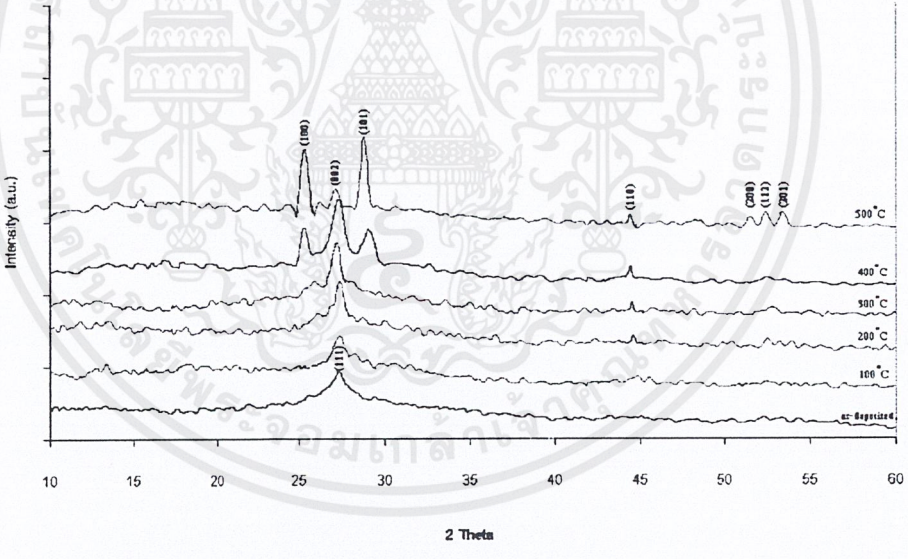
รูปที่6.12 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลภายใต้บรรยากาศซัลเฟอร์ เป็นเวลา20นาที

6.5 ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นจึงนำฟิล์มบางที่เตรียม ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคที่ปรากฏ และนำไปเปรียบเทียบกับพีคมาตราฐานของ CdS เพื่อให้รู้ว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงผลึกเป็นแบบใด พิจารณาจากรูปที่ 6.13 – 6.16 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีล และแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา20นาที พบว่าโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะเกิดพีคของระนาบ (100), (002), (101), (110) และ (112) แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของ

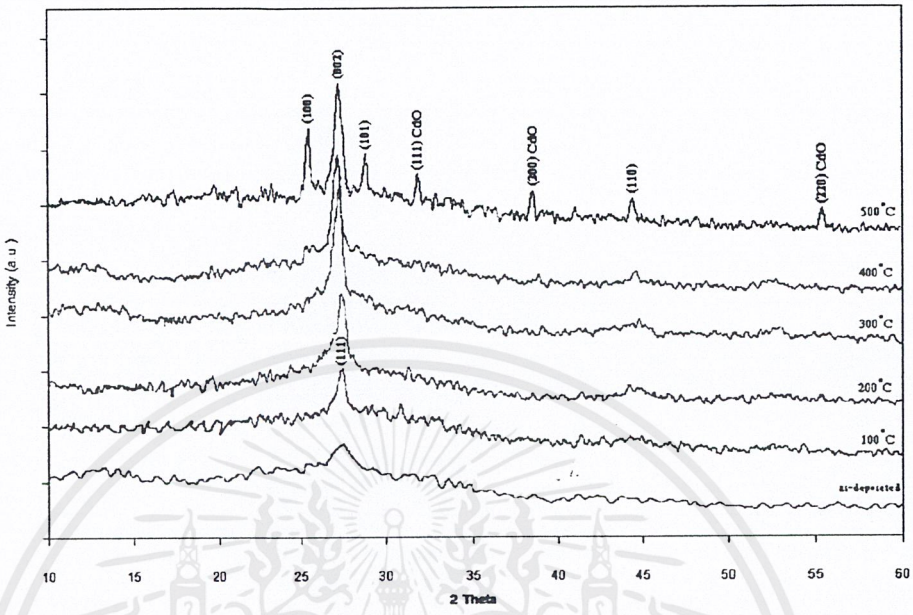
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบเฮ็กซะโกนอลเกิดด้วย ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 400°C โครงสร้างผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟส จากคิวบิกเป็นเฮ็กซะโกนอล และจากฟิล์มบางที่แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีPCD-CdS บนกระจก สไลด์ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีล และแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา20นาที พบว่าพีคที่เกิดขึ้นไม่ค่อยคมชัด ซึ่งมีสาเหตุมาจากปัญหาของขนาดของเกรนเล็กมาก

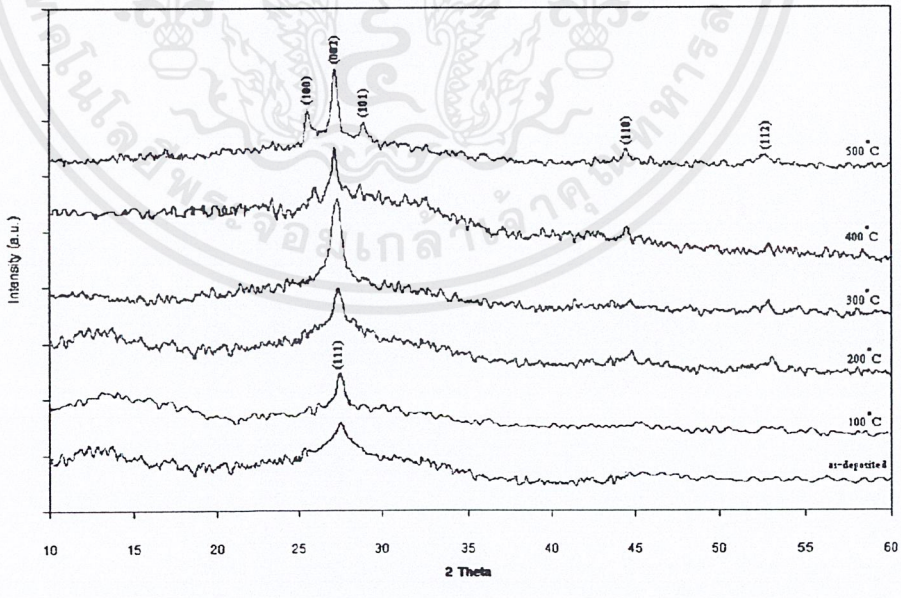


รูปที่ 6.13 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 6.16 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่การแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที

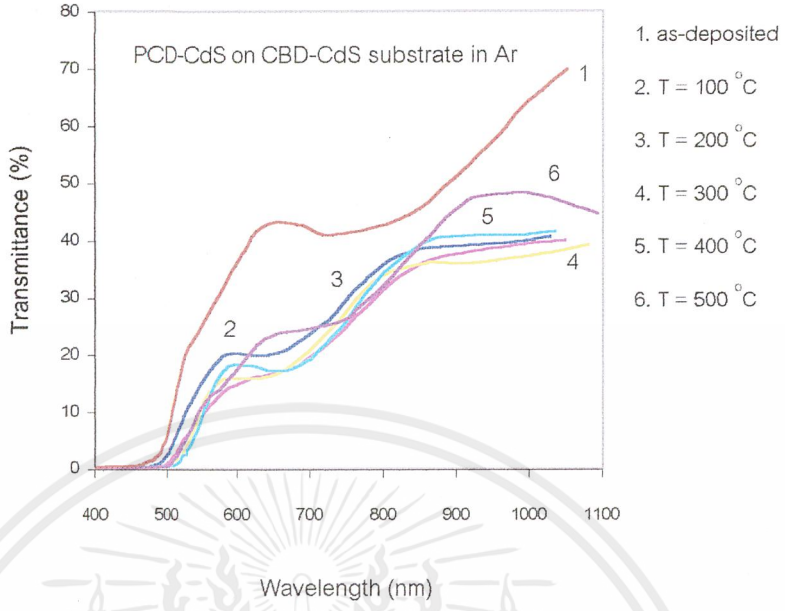
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

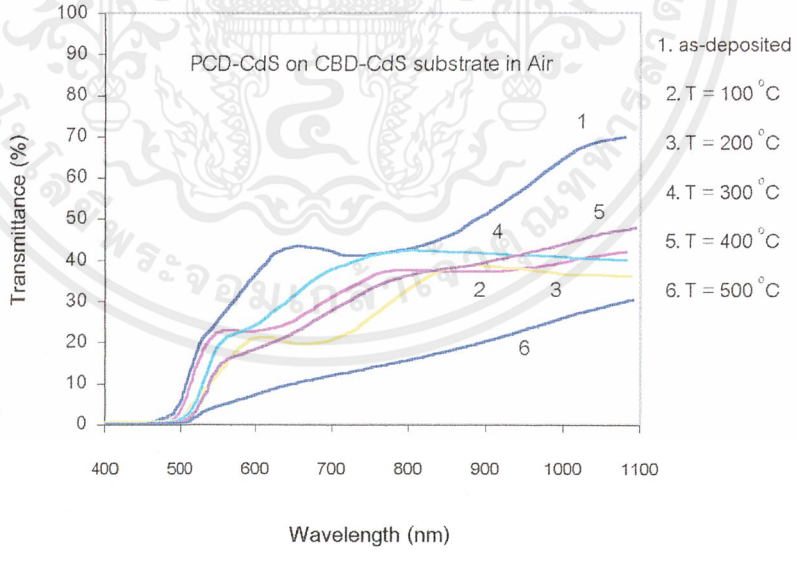
เมื่อทำการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางCdSด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีมยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ โดยเลือกใช้ความยาวคลื่น 300-1100nm พบว่ากรณีฟิล์มบางCdS ที่เตรียมด้วยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา20นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐานของฟิล์มบาง จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มีค่ามาก แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 400°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนกลับไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีนี้ จะสามารถส่งผ่านแสงได้มากกว่า 40% ดังแสดงในรูปที่ 6.17 – 6.20

สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C เป็นเวลา 20นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และในบรรยากาศสูญญากาศความดัน 0.1mbar พบว่าจะให้ผลเช่นเดียวกับกรณีฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนแผ่นรองรับ CBD-CdS กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มีค่ามาก แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 400°C ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนกลับไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดย วิธีการนี้จะสามารถส่งผ่านแสงได้มากกว่า 40% ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับวิธี PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ดังแสดงในรูปที่ 6.21 – 6.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

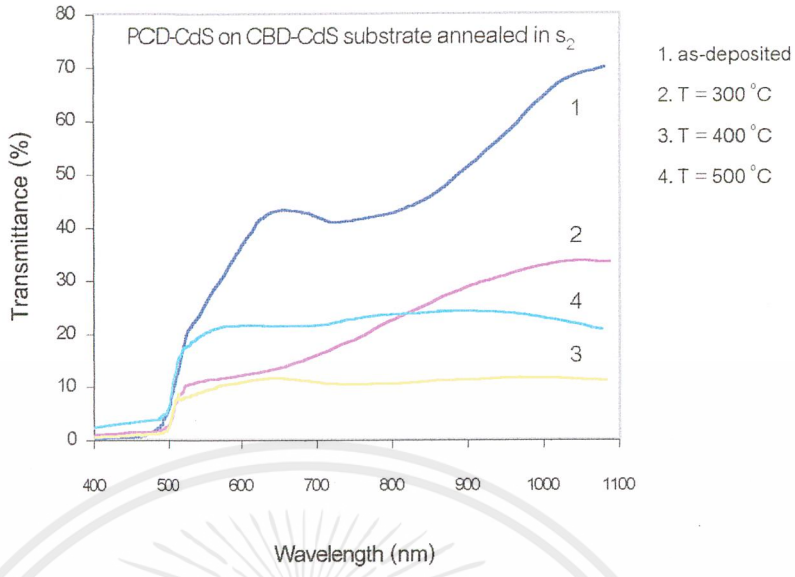


รูปที่ 6.17 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที

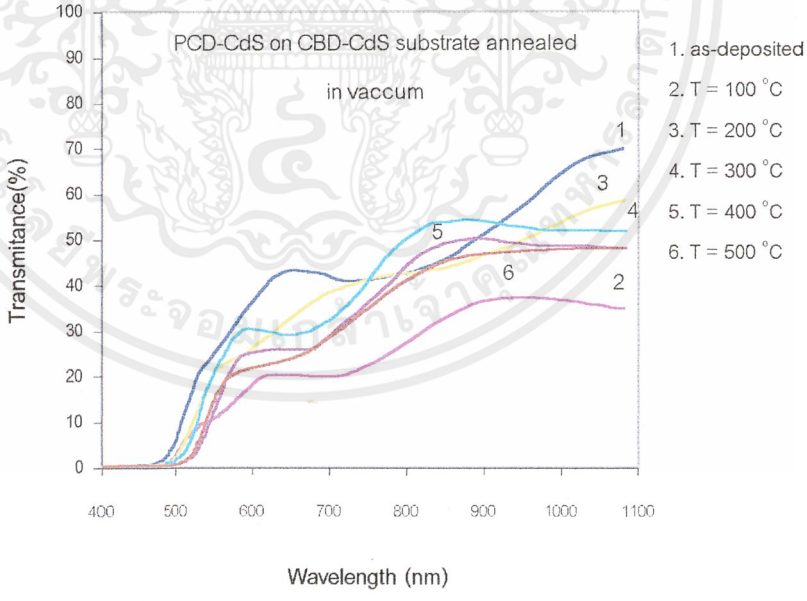


รูปที่ 6.18 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในอากาศเป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

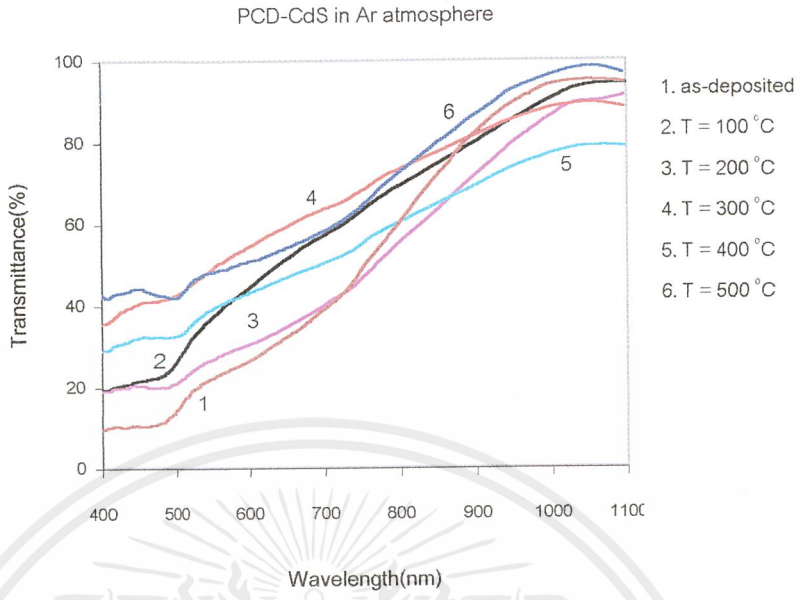


รูปที่ 6.19 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 300-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์เป็น เวลา 20 นาที

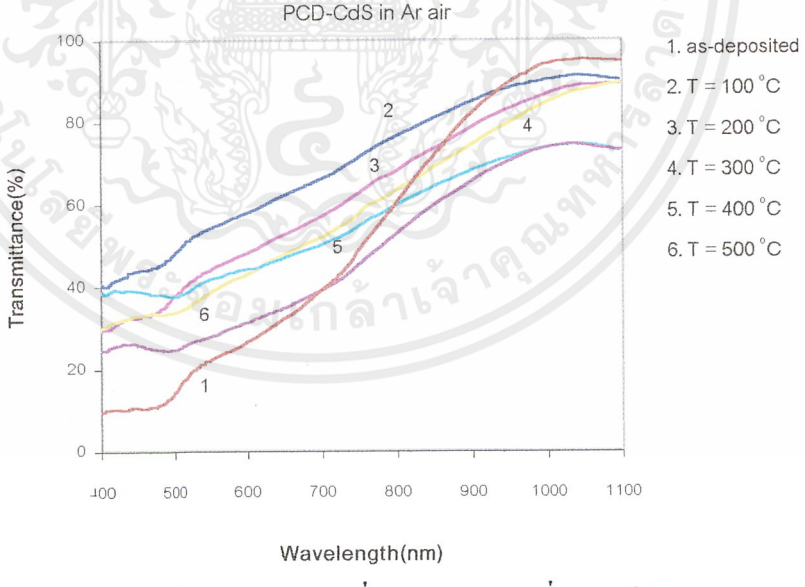


รูปที่ 6.20 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้สูญญากาศ ความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

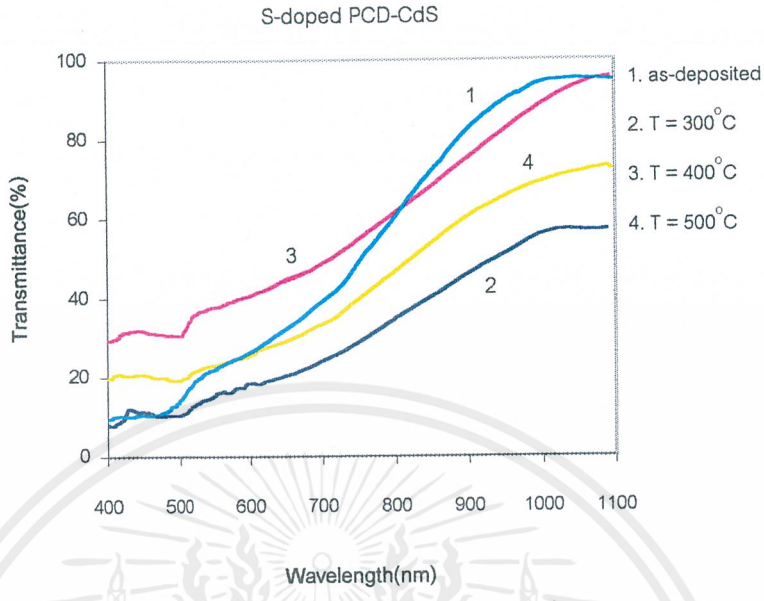


รูปที่ 6.21 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที

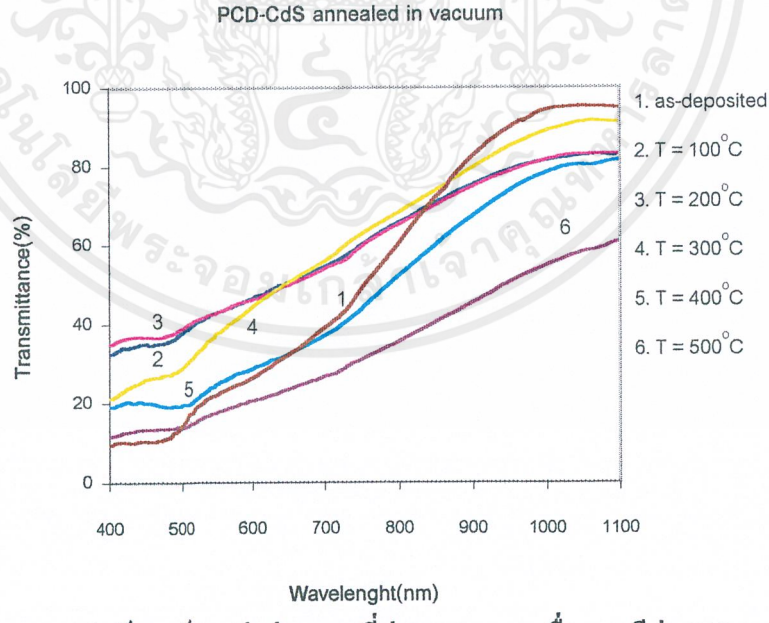


รูปที่ 6.22 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ในอากาศเป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 300-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์เป็นเวลา 20 นาที

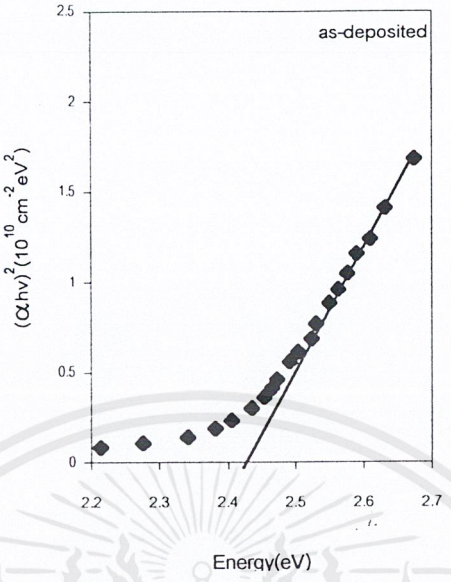


รูปที่ 6.24 แสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงมีค่า 300-1100nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีล และมีการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1 mbar เป็นเวลา 20 นาที

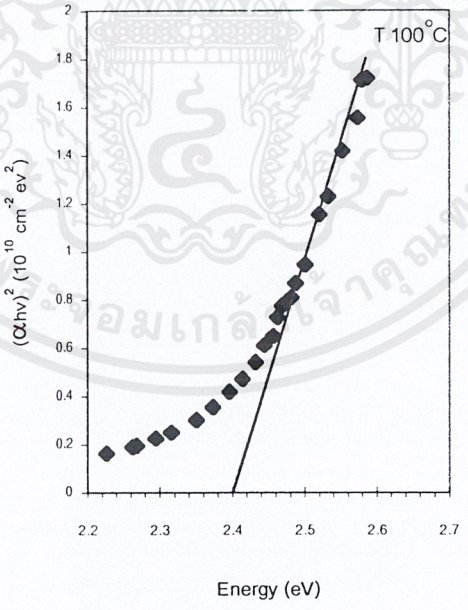
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าส่งผ่านของแสง มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) พบว่าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี ดังแสดงในรูปที่ 6.25-6.30 และฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 6.32-6.37 ที่เตรียมได้จะแสดงกราฟเป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นการแสดงว่าเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน และอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงมีการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแบบไม่มีกระบวนการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงแสดงว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ที่หาได้จากการลากเส้นตรงโดยประมาณ (extrapolation) ไปตัดแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดกราฟที่ได้คือ ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งพบว่ามีขนาดต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวเล็กน้อย ซึ่งเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ค่า E_g จะลดลง เนื่องจากผลของขนาดของเกรน (quantum size effect) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น ค่า E_g จึงลดลง และเมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 300°C ค่า E_g จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากในช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดการเปลี่ยนเฟสจากเฟสที่เป็นคิวบิกสมบูรณ์มาเป็นเฟสที่เป็นเฮ็กซะโกนอลสมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งคือเกิดการเปลี่ยนจากผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ (disorder) มาเป็นผลึกที่เป็นระเบียบ (order) [6] ดังแสดงในรูปที่ 6.31 และ 6.38 นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้นภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และในบรรยากาศสูญญากาศความดัน 0.1mbar พบว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจะลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.3 – 6.4 จากผลการทดลอง พบว่ามีผลสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้แล้ว [6,9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

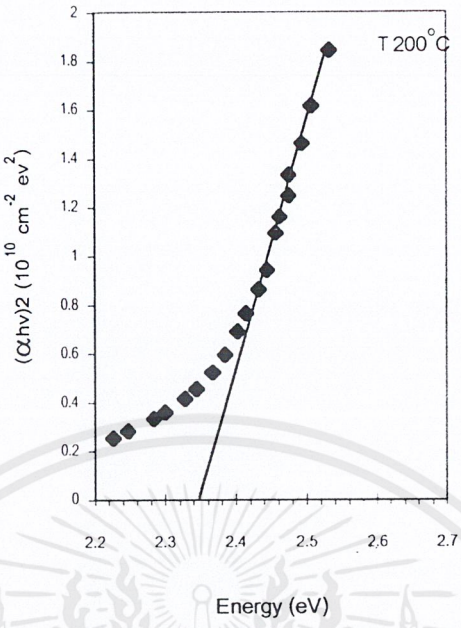


รูปที่ 6.25 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่ไม่ได้แอนนีล

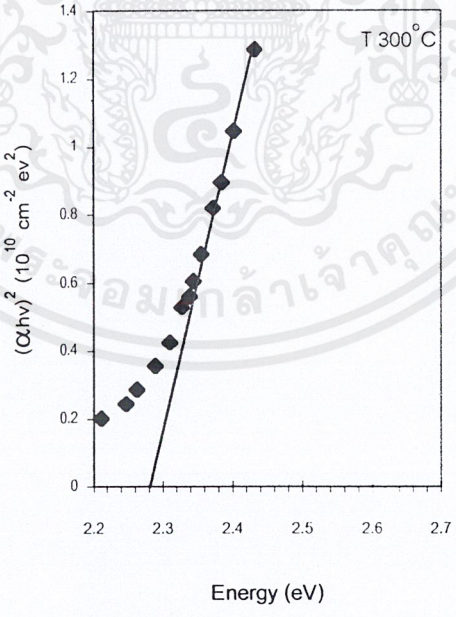


รูปที่ 6.26 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

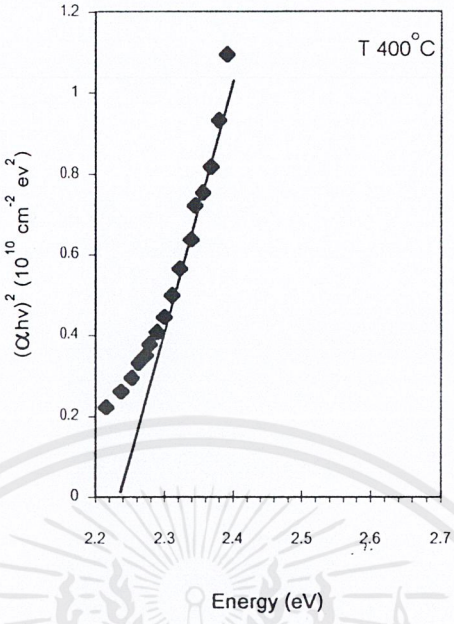


รูปที่ 6.27 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

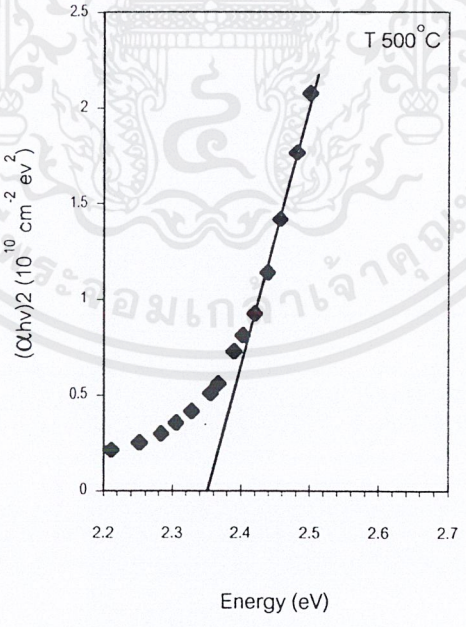


รูปที่ 6.28 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

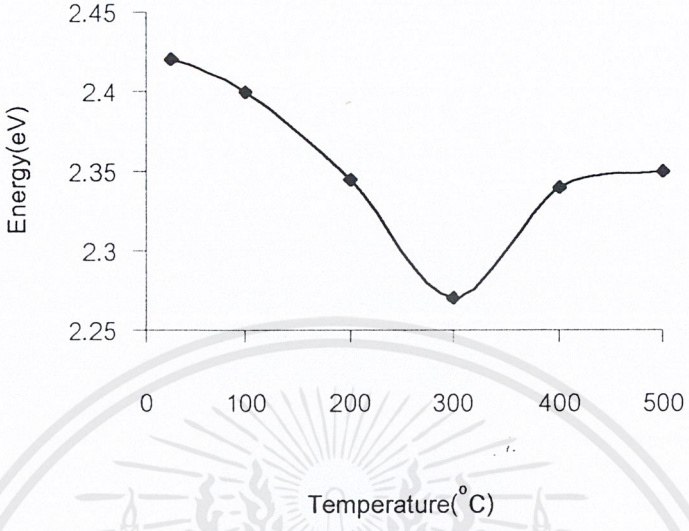


รูปที่ 6.29 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

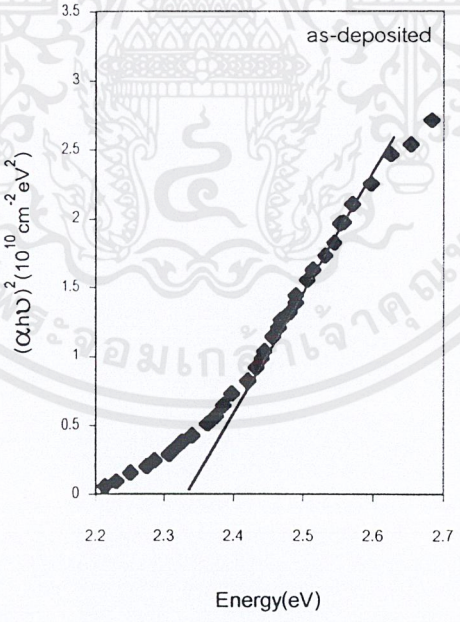


รูปที่ 6.30 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

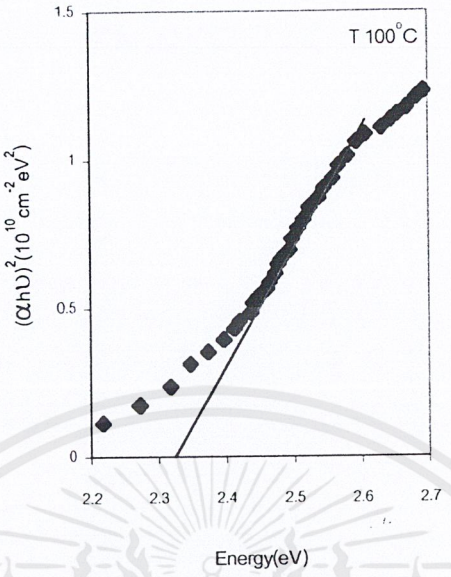


รูปที่ 6.31 แสดงกราฟค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที

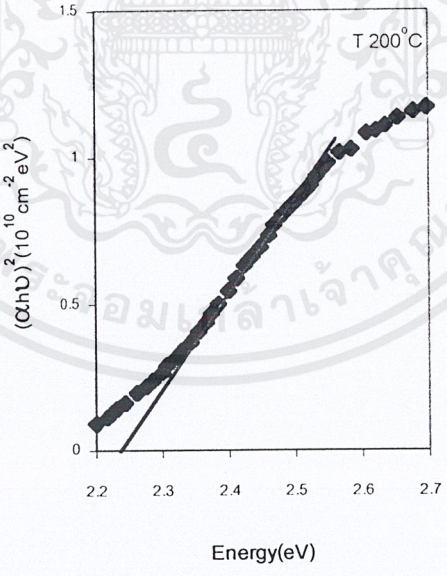


รูปที่ 6.32 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\upsilon$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่ไม่ได้แอนนีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

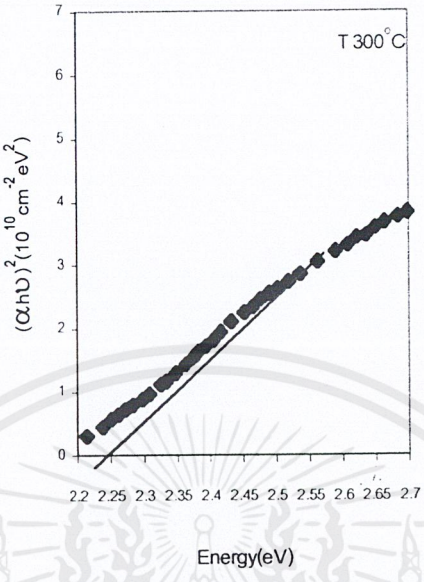


รูปที่ 6.33 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20นาที

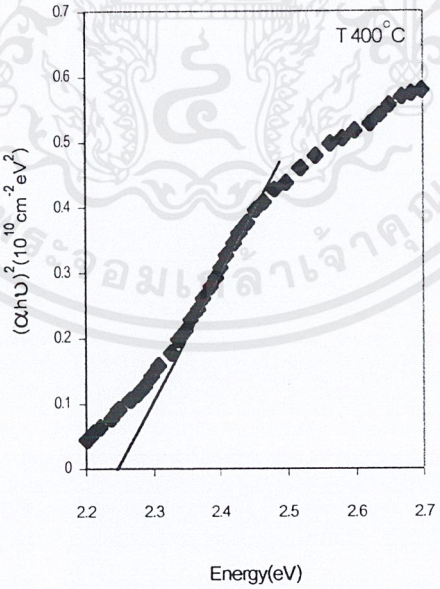


รูปที่ 6.34 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

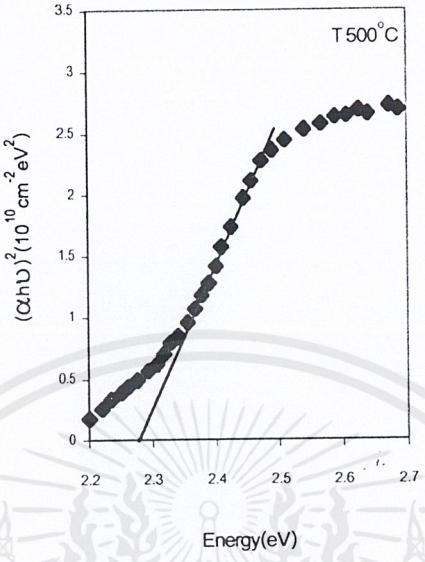


รูปที่ 6.35 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

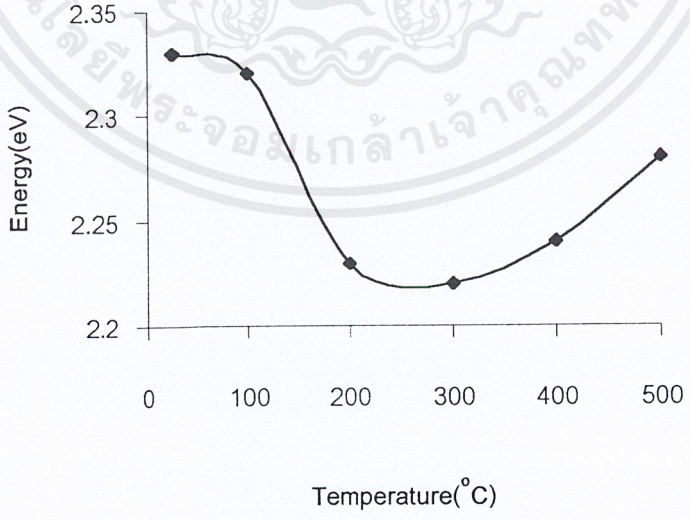


รูปที่ 6.36 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20นาที



รูปที่ 6.38 กราฟแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในบรรยากาศของก๊าซต่างๆเป็นเวลา 20 นาที

บรรยากาศ	อุณหภูมิแอนนีล (°C)					
	ไม่แอนนีล	100	200	300	400	500
air	2.42	2.42	2.37	2.33	2.31	2.29
Ar	2.42	2.4	2.35	2.27	2.24	2.35
S_2	2.42	-	-	2.38	2.37	2.39
Vacuum	2.42	2.39	2.38	2.30	2.25	2.30

ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) ของฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่แอนนีลที่อุณหภูมิ 100-500°C ในบรรยากาศของก๊าซต่างๆเป็นเวลา 20 นาที

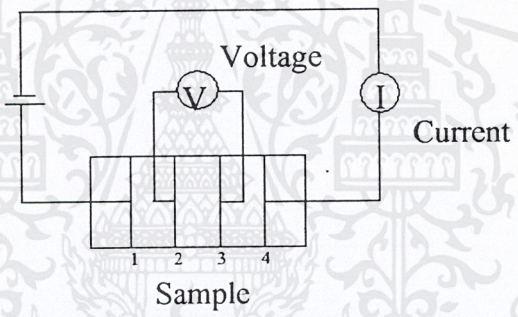
บรรยากาศ	อุณหภูมิแอนนีล (°C)					
	ไม่แอนนีล	100	200	300	400	500
Air	2.33	2.31	2.31	2.21	2.22	2.22
Ar	2.33	2.32	2.23	2.22	2.24	2.28
S_2	2.33	-	-	2.27	2.27	2.28
Vacuum	2.33	2.25	2.23	2.22	2.20	2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7 วิธีการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น

6.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่น

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แหล่งจ่ายไฟตรง แรงดัน 30โวลต์
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอดฮาร์โลเจน ELH กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ และหลอดไอปรอทความดันสูง กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 6.39 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

6.7.2 วิธีการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น

1. นำฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนีลและแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศและภายใต้สูญญากาศ ความดัน 0.1mbar เป็นเวลา20นาที มาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินนำไฟฟ้า แต้มเป็นแถบบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง จำนวน 4แถบ โดยใช้ระยะห่างระหว่างแถบประมาณ 3mm
2. ต่อวงจรดังรูปที่ 6.39
3. จ่ายกระแสให้วงจรและวัดแรงดันที่ได้ โดยทำการวัดประมาณ 10 ค่า ซึ่งการจ่ายกระแสควรจ่ายน้อยๆ
4. กลับขั้วแหล่งจ่ายกระแส (reverse bias) แล้วทำการทดลองดังข้อ 3
5. ทำตามข้อ3-4 แต่จะมีการฉายจากหลอดฮาร์โลเจน ELH ความเข้มแสง 95,000 ลักซ์ลงบนฟิล์มบาง PCD-CdS บนแผ่นรองรับ CBD-CdS ในกรณีที่ฟิล์มบาง PCD-CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบบนกระจกสไลด์จะฉายแสงด้วยหลอดไฟไอปรอทความดันสูง กำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 21,000 ลักซ์

6. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่าความต่างศักย์ โดยที่ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V}{I}\left(\frac{W}{L}\right) \qquad (6.1)$$

เมื่อ W = ความกว้างของฟิล์มบาง

L = ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 2 และ 3

$\frac{V}{I}$ = ความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าความต่างศักย์

6.7.3 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น

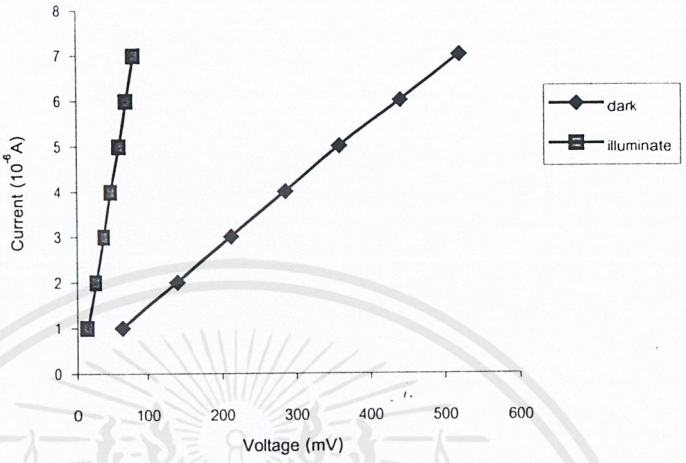
รูปที่ 6.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีอาบสารละลายเคมี ที่ยังไม่ได้แอนนีล ส่วนกลับของความชันคือความต้านทานของฟิล์มบาง พบว่าเมื่อฉายแสงความต้านทานจะลดลง สำหรับรูปที่ 6.41-6.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศ 0.1mbar เป็นเวลา20นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง กรณีฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS และฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH ความเข้มประมาณ 95,000 ลักซ์ พบว่าค่า R_s ขณะทำการฉายแสงจะมีค่าน้อยกว่าขณะไม่ฉายแสง แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการฉายแสงจะส่งผลให้ความต้านทานลดลง เนื่องจากการฉายแสงจะเป็นการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากกับดักจึงทำให้นำไฟฟ้าได้มากขึ้น ดังนั้นความต้านทานจึงลดลง และกับดักดังกล่าวเกิดขึ้นจากแวแคนซีของซัลเฟอร์ [17] และเกิดจากพันธะที่ไม่สมบูรณ์ที่ขอบเขตเกรน [18] ซึ่งจะจับอิเล็กตรอนอิสระเอาไว้ เมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งขณะฉายแสง และไม่มีการฉายแสง เมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ผลต่างของความต้านทานแผ่นขณะฉายแสงและไม่ฉายแสงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งหมายถึงเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้นฟิล์มบางจะตอบสนองต่อแสงลดลง มีสาเหตุมาจากเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น พันธะที่ไม่สมบูรณ์ที่ปรากฏที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

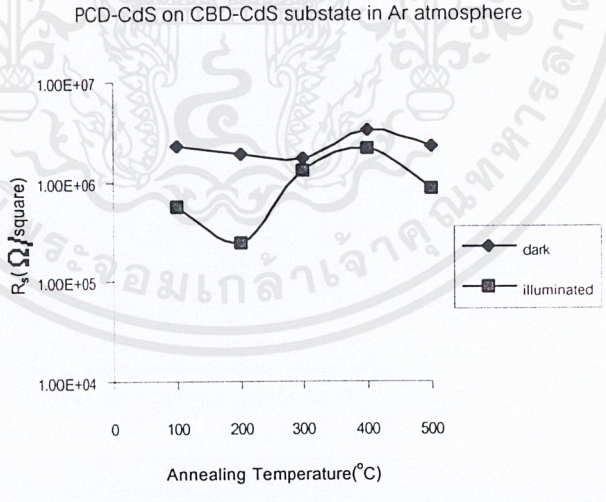
ขอบเขตเกรนมีปริมาณลดลง ดังนั้นปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกจับไว้ที่ขอบเขตเกรนจึงมีปริมาณลดลง ส่งผลทำให้ฟิล์มบางตอบสนองต่อแสงลดลง ส่วนในกรณีที่แอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 500°C ความต้านทานแผ่นลดลงอย่างมาก อาจเป็นเพราะว่ามีการเกิดแวแคนซีของซัลเฟอร์มากขึ้น ซึ่งมีอิทธิพลเหนือกว่า CdO หรือ $CdSO_4$ ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยจากแวแคนซีของซัลเฟอร์ภายใต้การฉายแสง จึงทำให้พาหะอิสระเพิ่มขึ้น ความต้านทานจึงลดลง

รูปที่ 6.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ที่ยังไม่ได้แอนนีล ส่วนกลับของความชันคือความต้านทานของฟิล์มบาง พบว่าเมื่อฉายแสงความต้านทานเพิ่มขึ้น รูปที่ 6.46-6.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน , ซัลเฟอร์ , ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศ 0.1mbar เป็นเวลา20นาที ขณะไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง ส่วนตารางที่ 6.5 และ 6.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ทั้งที่เตรียมบนกระจกสไลด์และบนแผ่นรองรับ CBD-CdS ที่แอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟไอปรอทความดันสูง พบว่าค่า R_s ขณะทำการฉายแสงจะมีค่ามากกว่าไม่ฉายแสง เนื่องมาจากว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ถูกจับไว้ที่ขอบเขตเกรนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผู้รายงานว่าออกซิเจนที่ถูกจับในขอบเขตเกรนจะแสดงระดับพลังงานของกับดักอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ต่ำกว่าแถบนำ0.9eV[17] ซึ่งเป็นระดับพลังงานลึก โดยส่วนใหญ่ระดับพลังงานลึกนี้ จะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) เมื่อมีการฉายแสงปริมาณอิเล็กตรอนและโฮลที่เพิ่มขึ้นจะถูกจับ และไปรวมตัวกันที่ศูนย์กลางการรวมตัวนี้ ส่งผลให้ความต้านทานภายใต้การฉายแสงมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่แอนนีลในอากาศ พบว่าค่า R_s จะคงที่ที่อุณหภูมิแอนนีล 100-300°C ทั้งกรณีไม่ทำการฉายแสงและทำการฉายแสง และเมื่อที่อุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากว่าที่อุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้นจะปรากฏเฟสของ CdO หรือ $CdSO_4$ ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง ซึ่ง CdO หรือ $CdSO_4$ จะมีลักษณะเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ความต้านทานมีค่ามากขึ้น [17,18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

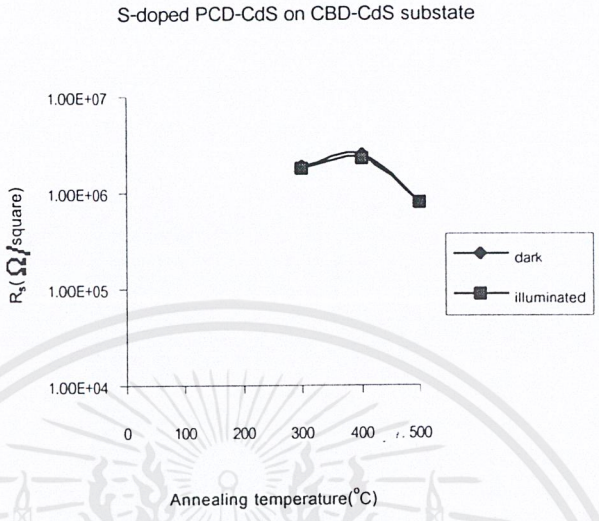


รูปที่ 6.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อไม่มีการแอนนีล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

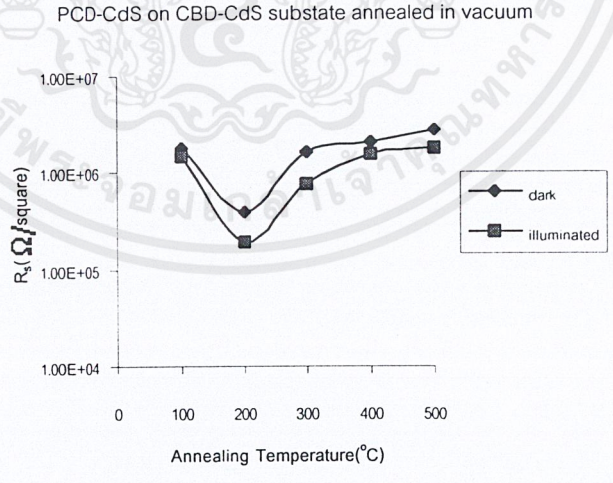


รูปที่ 6.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

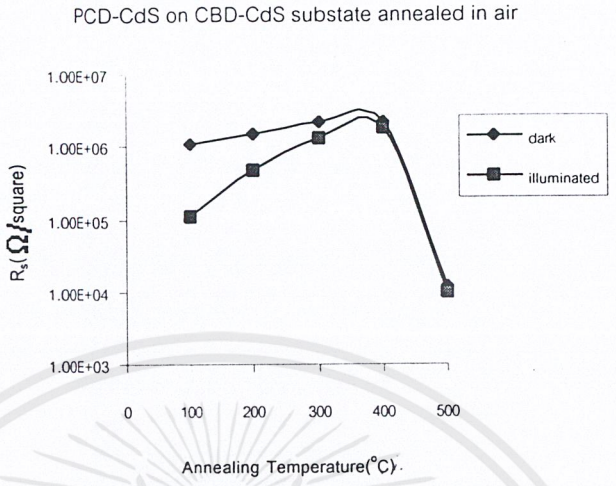


รูปที่ 6.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

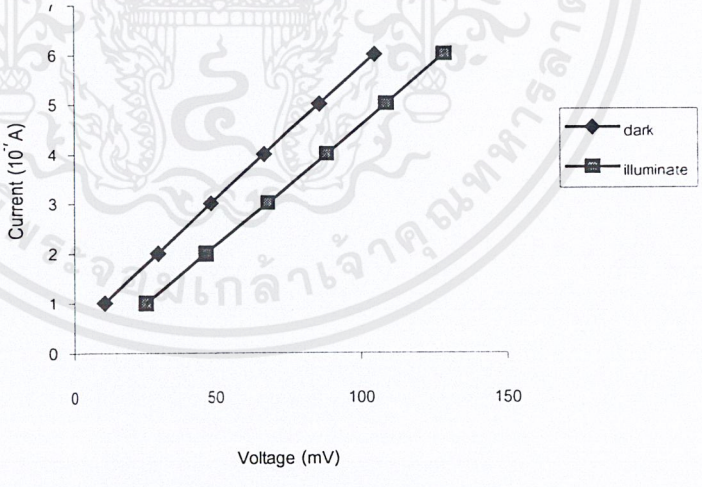


รูปที่ 6.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdSที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลภายใต้สูญญากาศ ความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

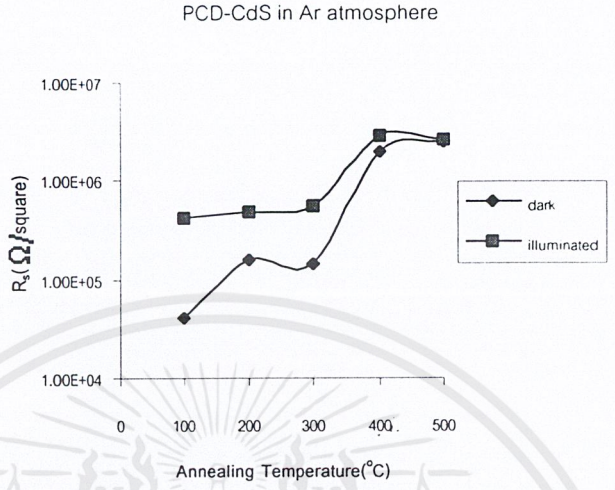


รูปที่ 6.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อแอนนีลในอากาศเป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 100 mW/cm^2

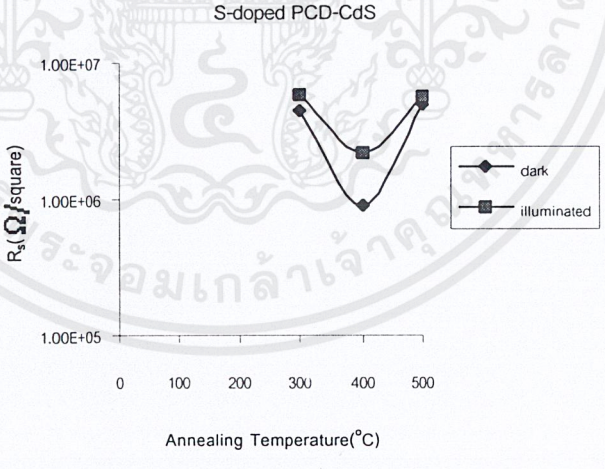


รูปที่ 6.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความต่างศักย์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีล ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

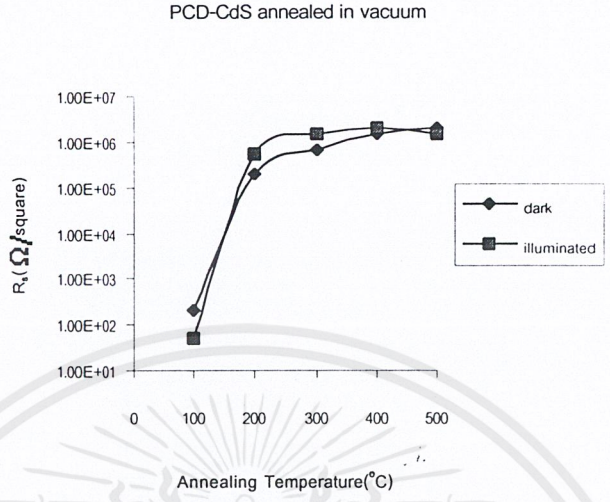


รูปที่ 6.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีล ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์

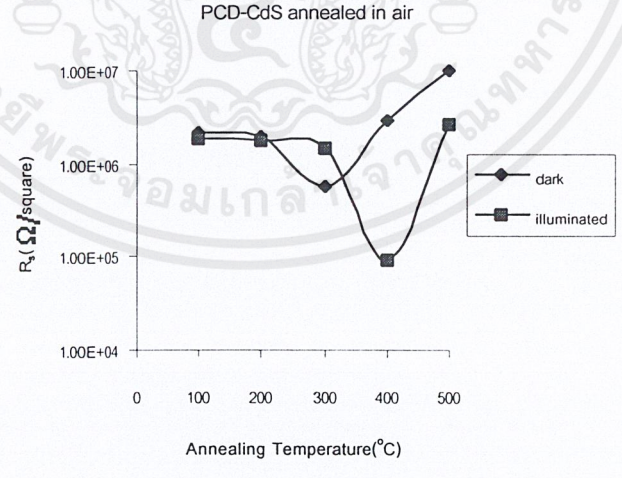


รูปที่ 6.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสง และฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสง ด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์



รูปที่ 6.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นกับอุณหภูมิแอนนีลของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ เมื่อแอนนีลในอากาศ เป็นเวลา 20 นาที ขณะที่ไม่มีการฉายแสงและฉายแสงด้วยความเข้ม 21,000 ลักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์และบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อไม่ทำการฉายแสง ที่อุณหภูมิแอนนีลต่างๆ ณ บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศและภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที

Temperature(°C)	Rs(Dark) (Ω / □)							
	PCD-CdS on CBD-CdS				PCD-CdS			
	Air	Argon	Sulfur	Vacuum	Air	Argon	Sulfur	Vacuum
100	1.1E+06	2.3E+06	-	1.8E+06	2.2E+06	4.1E+04	-	2.0E+02
200	1.5E+06	1.9E+06	-	3.8E+05	1.9E+06	1.6E+05	-	2.0E+05
300	2.2E+06	1.7E+06	1.9E+06	1.7E+06	5.8E+05	1.5E+05	4.4E+06	6.9E+05
400	2.1E+06	3.3E+06	2.5E+06	2.1E+06	2.9E+06	1.9E+06	9.0E+05	1.5E+06
500	1.2E+04	2.3E+06	7.8E+05	2.8E+06	9.9E+06	2.5E+06	5.0E+06	1.9E+06

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์และบนแผ่นรองรับ CBD-CdS เมื่อทำการฉายแสงที่อุณหภูมิแอนนีลต่างๆ ณ บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศและภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที

Temperature(°C)	R_i(Illuminated) (Ω / □)							
	PCD-CdS on CBD-CdS				PCD-CdS			
	Air	Argon	Sulfur	Vacuum	Air	Argon	Sulfur	Vacuum
100	1.1E+05	5.7E+05	-	1.5E+06	1.8E+06	4.1E+05	-	5.2E+01
200	4.6E+05	2.5E+05	-	1.9E+05	1.8E+06	4.8E+05	-	5.2E+05
300	1.3E+06	1.3E+06	1.8E+06	7.7E+05	1.4E+06	5.5E+05	5.9E+06	1.5E+06
400	1.8E+06	2.1E+06	2.2E+06	1.6E+06	9.3E+04	2.8E+06	2.2E+06	2.0E+06
500	9.6E+03	8.6E+05	7.7E+05	1.8E+06	2.7E+06	2.6E+06	5.7E+06	1.4E+06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในโครงงานพิเศษนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีทางเคมี-แสง ซึ่งปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ $[CdSO_4 . 8/3H_2O]+[Na_2S_2O_3 . 5 H_2O] + H_2SO_4$ โดยมีความเข้มข้น $2x10^{-3}$ M และ 0.1 M ตามลำดับ ถูกมาทำปฏิกิริยากันใน ภาชนะที่สามารถทนต่อความเป็นกรดของสารเคมีขนาด 400 ml โดยเท $[CdSO_4 . 8/3H_2O]+[Na_2S_2O_3 . 5H_2O]$ ลงในภาชนะที่สามารถทนต่อความเป็นกรด จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่วางบนฐานรองที่ทำจากพลาสติกทนสภาพความเป็นกรดของสารเคมีวางลงในภาชนะดังกล่าว ใส่ตัวกวนสารละลาย เทน้ำปลอดประจุ 400 ml นำภาชนะดังกล่าววางบนเตาให้ความร้อนโดยการเปิดสวิทซ์ไปที่ระดับ 3 ทำการหยดกรดซัลฟูริก 18 หยด จะได้ค่า pH ประมาณ 3 จึงรีบกวนสารละลาย และเปิดแสงจากหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำโดยทันที ใช้เวลาในการเคลือบ 60 นาที และเคลือบจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 100,200,300,400 และ500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ก๊าซซัลเฟอร์, ในอากาศ และภายใต้สูญญากาศความดัน 0.1mbar เป็นเวลา 20 นาที ฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี จะมีลักษณะสีเหลืองส้ม โปร่งแสง มีตะกอนเกาะอยู่บริเวณผิวหน้า สำหรับฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนกระจกสไลด์ จะมีลักษณะสีเหลืองอ่อน มีตะกอนเกาะอยู่บริเวณผิวหน้าเช่นกัน

เมื่อทำการแอนนีลที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ซัลเฟอร์, ในอากาศ และในสูญญากาศความดัน 0.1 mbar เป็นเวลา 20 นาที จะทำให้ฟิล์มบางมีสีเข้มมากขึ้น จะสังเกตเห็นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิ 300°Cขึ้นไป และเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิประมาณ 500°C จะพบว่าอะตอมของซัลเฟอร์หลุดมาเกาะบริเวณปลายหลอดของเตาแอนนีล โดยคิดว่าส่วนใหญ่จะมาจากตะกอนที่เกาะบนผิวหน้า โดยสังเกตได้ว่า ตะกอนที่เกาะบนผิวหน้าจะน้อยลงเมื่อแผ่นรองรับที่ใช้มาจากการเคลือบด้วยวิธี CBD เนื่องมาจากว่าแผ่นรองรับนี้จะมีตำแหน่งก่อเกิดที่มีปริมาณมาก ทำให้อะตอมของแคดเมียมและซัลเฟอร์เกาะบริเวณพื้นผิวได้ดีมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอาบสารละลายเคมี เมื่อไม่มีการแอนนีล จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก และเมื่อทำการแอนนีลจะพบพีคการเลี้ยวเบนมีจำนวนเพิ่มขึ้น และเมื่อแอนนีลที่อุณหภูมิมากกว่า 400°C จะปรากฏพีค (002) ซึ่งแสดงความเป็นเฮ็กซะโกนอลเป็นพีคที่เข้มและคมชัด โดยความกว้างของพีคจะลดลง อาจกล่าวได้ว่าที่ช่วงอุณหภูมิ 400-500 °C ฟิล์มบาง CdS จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก หรือเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮ็กซะโกนอลนั่นเอง สำหรับฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ จะเกิดพีคที่ไม่คมชัดนัก เนื่องจากขนาดของเกรนที่เล็กมาก

เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาการส่งผ่านแสง พบว่าขนาดของค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีล โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีลประมาณ 400°C จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 400 °C โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอาจมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

ก. ค่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกที่ต่างกันย่อมมีค่าต่างกัน

ข. เกิดส่วนปลายของแถบพลังงาน (band tail) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ (disoder)

ค. ผลจากควอนตัมของขนาดเกรนผลึก (quantum size effect)

การลดลงของช่องว่างแถบพลังงาน เกิดเมื่ออุณหภูมิการแอนนีลน้อยกว่า 400 °C ซึ่งเป็นผลจากควอนตัมของขนาดเกรนผลึก กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนหรือขนาดของกลุ่มก้อนผลึกจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงกว่า 400 °C ช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากอะตอมต่างๆอยู่ในตำแหน่งที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งจะลดปัญหาจากส่วนปลายของแถบพลังงาน โดยช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮ็กซะโกนอลที่อุณหภูมิแอนนีลประมาณ 400°C แต่ค่าช่องว่างแถบพลังงานของเฟสคิวบิก และเฮ็กซะโกนอลจะไม่แตกต่างกันมาก และผู้รายงานว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบเฮ็กซะโกนอลมีค่ามากกว่าพลังงานของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกประมาณ 0.1eV[19]

ความต้านทานแผ่นวัดโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นจะมีแนวโน้มลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิแอนนีลประมาณ 300°C จากนั้นความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแอนนีลอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยความต้านทานแผ่นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ แวแคนซีของอะตอมซัลเฟอร์, การจัดเรียงตัวอะตอมแบบดิสออร์เดอร์, ผลของควอนตัมของขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกรนผลึก, พันธะที่ไม่สมบูรณ์ที่บริเวณขอบของเกรน, ออกซิเจนที่ถูกจับไว้ที่ผิวหน้า และที่ขอบของเกรนทั้งในแบบเชิงฟิสิกส์ (physisorption) และ เชิงเคมี (chemisioption)

เมื่ออุณหภูมิแอนนีลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ขอบเขตของเกรนลดลง ส่งผลให้อิเล็กตรอนหรือโฮลไหลได้สะดวกขึ้น ดังนั้นช่วงอุณหภูมิแอนนีลต่ำกว่า 300°C ความต้านทานแผ่นจะขึ้นกับผลของขนาดของเกรน แต่ช่วงอุณหภูมิมากกว่า300°Cโครงสร้างของฟิล์มบางจะมีความเป็นระเบียบมากขึ้น[6] รวมทั้งออกซิเจนที่ถูกจับเอาไว้ที่ผิวหน้าฟิล์มบาง และที่ขอบของเกรนแบบเชิงฟิสิกส์ ซึ่งจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยออกซิเจนจะรวมตัวกับอะตอมของธาตุที่อยู่บนฟิล์มบาง กลายเป็นโมเลกุลของสารประกอบใหม่ โดยการจับอิเล็กตรอนอิสระมาสร้างเป็นพันธะเคมี ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจะลดลง ค่าความต้านทานแผ่นจึงเพิ่มขึ้น[18]

ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมบนแผ่นรองรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีอาบสารละลายจะลดลงเมื่อทำการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน แสดงว่าอิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแสงมากระตุ้นให้หลุดออกจากกับดักอิเล็กตรอน โดยเมื่ออุณหภูมิการแอนนีลสูงขึ้นส่งผลการตอบสนองต่อแสงมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนหางของแถบพลังงานลดลงจึงทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนจากกับดักอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นระดับพลังงานลึกเคลื่อนย้ายไปยังแถบนำได้น้อยลง และ/หรือ ปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกจับในกับดักมีปริมาณลดลง เนื่องจากอุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้นทำให้ปริมาณกับดักลดลง กับดักดังกล่าวอาจเป็นพันธะที่ไม่สมบูรณ์ที่ปรากฏในขอบของเกรน เป็นต้น และความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมบนกระจกสไลด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการฉายแสงจากหลอดไฟที่บรรจุไอปรอทความดันสูง แสดงว่าอิเล็กตรอนและโฮลขณะทำการฉายแสงจะถูกจับ และเกิดการรวมตัวกันที่ศูนย์กลางการรวมตัว ส่งผลให้ความต้านทานแผ่นภายใต้การฉายแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ได้มีผู้รายงานว่าพบปรากฏการณ์แบบนี้ในฟิล์มบางของ CdS ที่เตรียมโดยวิธีอาบสารละลายเคมี [20] ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของกับดักพาหะหลายระดับพลังงาน

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคลือบทางเคมี-แสง พบว่ามีเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด โดยจำแนกได้ดังนี้

- จากเทคนิค PCD ได้ใช้แผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่จากการทดลองพบว่ามีฟิล์มบาง CdS ไปเคลือบบนภาชนะที่ใส่สารละลายและวางแผ่นรองรับซึ่งทำจากพลาสติก ดังนั้นควรลองเปลี่ยนแผ่นรองรับเป็นวัสดุอื่น เช่น พลาสติก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากการทดลองการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธี PCD พบว่า ถ้าใช้แผ่นรองรับเป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธี CBD จะทำให้โมเลกุลของแคดเมียมและซัลเฟอร์เกาะติดดีกว่าใช้แผ่นรองรับเป็นกระจกสไลด์ เนื่องจากว่าจะมีตำแหน่งก่อเกิดมากกว่า ดังนั้นควรลองใช้แผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารประกอบต่างชนิดกันที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน เช่น ฟิล์มบาง In_2O_3 เป็นต้น โดยจะใช้การเตรียมด้วยวิธีเดียวกัน หรือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลอง
- ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธี PCD ได้ใช้ระยะเวลาในการเคลือบ 1ชม. ซึ่งเราควรศึกษาว่าระยะเวลาที่มากกว่านี้จะส่งผลให้ฟิล์มบางมีการเคลือบติดได้ดีขึ้น หรือก่อนการทำปฏิกิริยาของสารละลาย ควรจะมีความร้อนของสารละลายเท่าใด จึงจะทำให้ฟิล์มมีการเคลือบติดดีขึ้น โดยจากการทดลองของเราได้ทำการให้ความร้อนโดยเปิดสวิทซ์ที่ระดับ 3 ก่อนที่จะใส่กรดซัลฟูริก แล้วทำการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-19 *Radiation* = 1.540598 *Quality :* Calculated

Cd S

Cadmium Sulfide

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/Icor* = 14.06

2th	I	h	k	l
26.547	100	1	1	1
30.748	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
87.069	6	5	1	1

ICSD COLLECTION CODE : 067789
REMARKS FROM ICSD : REM THE.
TEST FROM ICSD : No R value given.
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

Pattern : 75-1545 *Radiation* = 1.540598 *Quality :* Calculated

Cd S

Cadmium Sulfide

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/Icor* = 7.99

2th	I	h	k	l
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
51.806	30	1	1	2
52.783	14	2	0	1
54.547	2	0	0	4
58.258	5	2	0	2
60.803	2	1	0	4
66.743	12	2	0	3
69.243	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

ICSD COLLECTION CODE : 031074
TEST FROM ICSD : No R value given.
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ชิตพล ตั้งกมลสุข เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2521 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย และได้รับการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2541

นาย วรวุฒิ ถาวรไพศาลกุล เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และได้รับการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2541

นางสาว อริยา แพทย์พิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2523 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนศรีอยุธยา และได้รับการศึกษาในระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในคณะวิทยาศาสตร์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Yamaguchi , T., Yamamoto , Y., Tanaka , T. and Yoshida , A., "Preparation and Characterization of (Cd,Zn)S Thin Films by Chemical Bath Deposition for Photovoltaic Devices" ,Thin Solid Films 343-344,(1999) : 516-519.
2. Sze, S.M., in Physics of Semiconductor Devices,2nd ed., pp.848-849, John Wiley&Sons Inc., New York,1981.
3. Goto, F., Lchimura, M. and Arai, E., "A New Technique of Compound Semiconductor Deposition from an Aqueous Solution by Photochemical Reaction", pp. J. Appl. Phys.36, (1997) : L1146-L1149.
4. Ichimura M.,Goto, F. and Arai, E., "Photochemical Depositton of CdS from Aqueous Solutions", J. Electrochem. Soc 146 (3), (1999) : 1028-1034.
5. Ichimura, M., Goto, M., Ono, Y. and Arai, E., "Deposition of CdS and ZnS from Aqueous Solution by a New Photochemical Technique", Journal of Crystal Growth 198-199, (1999) : 308-312.
6. Ichimura, M., Goto, F. and Arai,E., "Structural and Optical Characterization of CdS Films Grown by Photochemical Deposition", J. Appl. Phys. 85(10), (1999) : 7411-7417.
7. Wang C. Y., Mo X., Zhu Y. R., Liu H.T. and Chen Z. Y., "A Convenient Ultraviolet Irradiation Technique for *in Situ* Synthesis of CdS Nanocrystallites at Room Temperature", J. Mater. Chem. 10, (2000) : 607-608.
8. Kittel, C., in Introduction to Solid State Physics, 4th ed., John Wiley&Sons Inc., New York,1971.,pp. 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 611-612, 662-663, 641-676.
9. งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ,"การเตรียมฟิล์มบางและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง (Cd,Zn) S เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์", รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
10. ดุสิต เครืองาม , โซลิดสเตทฟิสิกส์ , พิมพ์ครั้งที่ 1 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2521.
11. Cullity,B.D., in Elements of X-ray Diffraction, pp.9-14, Addison-Wesly Publishing Company Inc., 1956.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. สิงหเดช แตงจวง, "การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอาบสารละลายเคมี", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2539.

13. Abelas,F,.in Optical Properties of Solids, pp.23-40, North-Holland,London,1972.

14. จักรพันธ์ ทองเจริญ และอภิวัฒน์ กมลทวิกุล, "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์", โครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2542.

15. จารุทัศน์ เตชะวิจิตรา, สาวิตรี เปรมรัตนวงศ์ และหัสพร ทองแดง, "การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์",โครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2543.

16. Runyun,W.R.,in Semiconductor Measurement and Instrumentation, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombary, New York,1975.

17. Lee,J.H., Lee,H.Y., Kim,J.H. and Park,Y.K., "Heat Treatment of Boron-Doped CdS Films Prepared by Chemical Bath Deposition for Solar Cell Applications", Jpn.J.Appl.Phys.39, (2000):1669-1674.

18. Petre,D., Pintilie,I., Pentia,E. and Botila,T., "The Influence of Cu Doping on Optoelectronic Properties of Chemically Deposited CdS" ,Mater.Sci.Eng. B58, (1999):238-243.

19. Zehe,A. and Vazquez Luna,J.G., "Magnetic Field Influenced Growth Thickness in Chemical CdS Thin Film Deposition", Sol. Ener Mar.&Solar Cells 68, (2001):217-226.

20. Chu,T.L., Chu,S.S., Britt,J. Ferekides,C. and Wu,C.Q. ,"Cadmium Zinc Sulfide Films for Heterojunction Devices", Proceeding of IEEE Photovoltaic Specialists Conference 1991 : 1136-1140.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้