

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Fabrication of CdS Thin Films by Photochemical Deposition

Method for Solar Cell

โดย

นางงามนิตย์ แก้วแดง

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิทธิ์ ภูรัักษ์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2547

REH

TA

4/89

5451

58922

17 ก.พ. 2549

วัน,เดือน,ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อเจ้าหน้าที่หอสมุดฯ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11506046

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี ก็เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตรภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี และดร. ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอแสดงความขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องชั่งสาร, กล้อง โลหะลดสัญญาณรบกวนและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ และ เตาเผาอุณหภูมิสูง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้อง ดิจิตอลในการถ่ายรูปและจัดสรรเงินสวัสดิการของภาควิชาฯ สมทบด้วย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณ กัญญา ศิริโกชน์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง ยูวี - วิสลิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV / visible spectrometer JUSCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลต และย่านตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และรองศาสตราจารย์สมศักดิ์ เชื้อศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้น้ำปลอดประจุมาใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร โอสดจันท์ ดร. เต็มศักดิ์ ศิขรินทร์ และ ดร. อุดม รอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรี พุฒพัฒน์ และ คุณรวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรค โทมิเตอร์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ และ คุณ จรินทร์ โพธิไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่อาคาร ฟีกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นายณัฐพร พรหมรส นายพินัย สถิตเวโรจน์ และนายวัฒนา สุดา นักศึกษาระดับปริญญาตรี ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัย เก็บบันทึกข้อมูลจนเสร็จสิ้นโครงการ และขอขอบคุณนายวีรชัย ลิภา นายปกรณ์ สิทธิเขตต์กรณ์ นายสุกฤษฎ์ เกิดแสง และนายอุปถัมภ์ นาครัญ นักศึกษาระดับปริญญาโท ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2547 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย

การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

โดย

นางงามนิตย์ แก้วแดง

นาย จูตินัย แก้วแดง

นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ

ปีงบประมาณ

2547

บทคัดย่อ

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 , 1:5 , 1:10 , 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ จากวิธีเคมี-แสง ทั้งที่เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และเคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีอาบสารละลายเคมี เคลือบบนกระจกสไลด์ จากนั้นจึงมาศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าเกิดการเลี้ยวเบนของฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 °C พิกการเลี้ยวเบนจะสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสง พบว่าค่า E_g เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแอนนัล โดยจะมีค่า E_g อยู่ในช่วง 2.07-2.45 eV สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัล พบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 300 °C ความต้านทานแผ่นจะลดลง แต่หลังจากนั้นความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัลจนถึง 500 °C อีกทั้งยังได้ศึกษาความต้านทานแผ่นที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนัลภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟที่บรรจุไอปรอทความดันสูง พบว่าค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัลมีลักษณะเดียวกับที่พบในฟิล์มบางที่ไม่มีการฉายแสง

Project Title

Fabrication of CdS Thin Films by Photochemical Deposition

Method for Solar Cell

Name

Mrs. Ngamnit Gaewdang

Mr. Thitinai Gaewdang

Mrs. Tiparatana Wongchareon

Mr. Chaisingh Poo-Rakkiat

Year

2004

Abstract

CdS thin films, with different Cd:S ratio in the working solution being 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 and 1:50 respectively, have been deposited on glass slide substrate and on CBD-CdS seed layer by photochemical deposition technique (PCD). The crystal structure of the films was studied by XRD measurements. XRD patterns of the as-deposited and of the annealed PCD-CdS in N_2 ambient at annealing temperature lower than $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ were assigned to cubic structure. At annealing temperature above $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, XRD patterns seem to associate with hexagonal structure. Energy gap (E_g) ranging from 2.07 to 2.45 eV as a function of annealing temperature was evaluated from the optical transmission measurements. The sheet resistance value as a function of annealing temperature was also investigated. The sheet resistance decreases as the annealing temperature increases up to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and it increases again at annealing temperature above $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. The similar behavior was observed on the films performed under illumination by using a high pressure mercury lamp.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์	3
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์ 3	
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซท์	4
2.1.3 คัทนึมิลเลอร์	5
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก	7
2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	7
2.1.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	7
2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	10
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	10
2.2.2 การเกิดสีของผลึก	12
2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	12
2.2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	14
2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	15
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า	15
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	17
2.3.2.1 วิธีวัดตรง	17
2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	17
2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 หลักการการเกิดฟิล์มบางด้วยวิธีเคมี-แสง	20
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	23
4.1 การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD	23
4.2 การเตรียมแผ่นรองรับ	25
4.2.1 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	25
4.2.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียม โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์	25
4.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD	28
4.4 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	29
4.5 ผลจากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	33
4.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยวิธีการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆในฟิล์มบางด้วยวิธี EDS	37
4.7 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	39
4.7.1 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์	39
4.7.2 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	47
4.8 วิธีการทดลองและผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น	55
4.8.1 อุปกรณ์	55
4.8.2 วิธีการทดลอง	56
4.8.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	57
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	67
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1	แสดงความเข้มข้นและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 400 มิลลิลิตร
ตารางที่ 4.2	แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 มิลลิลิตร
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ทุกอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เมื่อไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ทุกอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เมื่อไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที
ตารางที่ 4.5	แสดงอัตราส่วนของปริมาณของธาตุ Cd:S ที่ได้จากวิธี EDS
ตารางที่ 4.6	แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างแบบเพชร	3
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของ CdS	4
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ของ CdS	4
รูปที่ 2.4 แสดงดัชนีมีลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	5
รูปที่ 2.5 แสดงดัชนีมีลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก	6
รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึก	7
รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก	8
รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ได้ออกมาจากผลึกและการหาขนาดของเกรน	8
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรีนซิก	10
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	11
รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอน ของสารกึ่งตัวนำกับพลังงานโฟตอนอุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$) (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการ สร้างโฟนอน	12
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง	14
รูปที่ 2.13 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น	17
รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	18
รูปที่ 2.15 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หน้า d	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.1	แสดงโคอะแกรมของเครื่องมือที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง	หน้า 21
รูปที่ 3.2	แสดงอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง ในโครงการวิจัยนี้	22
รูปที่ 4.1	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD	24
รูปที่ 4.2	แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD	26
รูปที่ 4.3	แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณ ความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 1 , 1 : 5 , 1 : 10 , 1 : 30 และ 1 : 50 ตามลำดับ เมื่อไม่มีการแอนนัล	30
รูปที่ 4.4	แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณ ความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	31
รูปที่ 4.5	แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของ ปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 1 , 1 : 5 , 1 : 10 , 1 : 30 และ 1 : 50 ตามลำดับ เมื่อไม่มีการแอนนัล	32
รูปที่ 4.6	แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของ ปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	32
รูปที่ 4.7	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจก สไลด์ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อไม่ มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	34
รูปที่ 4.8	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อ ไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที	35

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิแอนนัล 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50	35
รูปที่ 4.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่อุณหภูมิแอนนัล 100 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50	36
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 เมื่อไม่มีการแอนนัล โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า	38
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 เมื่อไม่มีการแอนนัล โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า	38
รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	40
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:5 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	41
รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:10 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	41

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	42
รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	42
รูปที่ 4.18 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่ไม่ได้แอนนัล	43
รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	44
รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	44
รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	45
รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	46
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	46
รูปที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	48
รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:5 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	48
รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:10 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	49
รูปที่ 4.29 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	50
รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่ไม่ได้แอนนัล	51
รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	51
รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 200°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	52
รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	52

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.34 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนียลที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	53
รูปที่ 4.35 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\nu)$ ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนียลที่อุณหภูมิ 500°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	53
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนียลและแอนนียลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที	54
รูปที่ 4.37 แสดงหลักการการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	56
รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	60
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:5 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	61
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:10 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	61
รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:30 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	62

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:50 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	62
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 1 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	63
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 5 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	63
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 10 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	64
รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 30 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	64
รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 50 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	65
รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	65
รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

- PCD = Photochemical Deposition Method = การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีเคมี-แสง
 CBD = Chemical Bath Deposition Method = การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสาลละลายเคมี
 SEM = Scanning Electron Microscope = กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 XRD = X-ray Diffraction = การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

จากความพยายามที่จะค้นแหล่งพลังงานอื่น ๆ มาทดแทนน้ำมันซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดลงและจะหมดไปจากโลกภายในเวลาอันใกล้นี้ แหล่งพลังงานที่สำคัญที่มีปริมาณมหาศาลและยาวนานคือพลังงานจากดวงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีโครงสร้างแบบ $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuInGaSe}_2/\text{Mo/glass}$ กำลังได้รับการพัฒนากันอย่างแพร่หลายทั้งในยุโรป อเมริกาและญี่ปุ่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ทั้งในแง่พัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มบางต่าง ๆ หรือพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใหญ่ขึ้น ฟิล์มบางของสารประกอบ CdS ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางมาเป็นเวลานาน เนื่องจากฟิล์มบางของสารประกอบนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมที่ใช้ทำเป็นหน้าต่างรับแสง (window) ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ แบบ $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$ CdS/CdTe และ $\text{CdS}/\text{CuInGaSe}_2$ เป็นต้น

ฟิล์มบางของ CdS เตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) วิธีการระเหยในสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) และวิธีเคลือบฟิล์มบางในสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น แต่เมื่อไม่นานมานี้ Ichimura และผู้ร่วมงาน [1-4] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีเคมี-แสง (photochemical deposition, PCD) ให้เคลือบบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm ลงในสารละลายเคมีที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบ CdSO_4 และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ซึ่งละลายในน้ำปอดประจุ (deionized water) ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีคุณภาพดียึดติดแน่นกับฐานรอง มีความเรียบมันวาว เกรนมีขนาดสม่ำเสมอ จากการแอนนัลฟิล์มบางด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง 400°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปเป็นเวิร์ทไซด์ [1] และพบว่าช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัลอีกด้วย แต่สำหรับคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า ยังไม่ได้มีการศึกษาเอาไว้

สมบัติเด่นของวิธี PCD ก็คือ เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ผลิตน้อยและสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ขนาดพื้นที่ใหญ่ กระบวนการเคลือบสามารถควบคุมได้โดยการเปิดและปิดแสง และสามารถสร้างรูปแบบของฟิล์มได้โดยการออกแบบที่หน้ากาก (mask) ของแสง ดังนั้น เทคนิคนี้จึงเป็นความคิดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ใหญ่

1.1 วัตถุประสงค์และขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง (PCD) จากสารตั้งต้น CdSO_4 และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น $2 \times 10^{-3} \text{ M}$ และ $1 \times 10^{-1} \text{ M}$ ตามลำดับ ปรับ pH มีค่าเท่ากับ 3.5 โดยการเติม H_2SO_4 ฉายแสงอัลตราไวโอเลตลงบนกระจกสไลด์ที่วางอยู่ใต้ผิวหน้าสารละลายในระยะประมาณ 3 mm โดยใช้ความยาวคลื่น 254 nm ที่ได้จากหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำ กำลังไฟฟ้า 38 W ระยะเวลาในการเคลือบ 1 ชั่วโมง และได้แปรเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นให้มีอัตราส่วน Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์

2. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

3. เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและทำการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

4. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสง (optical transmission) ของฟิล์มบาง CdS เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

5. วัดความต้านทานแผ่น (sheet resistance) โดยใช้เทคนิคแบบสี่ขั้วเชิงเส้น

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. คณะผู้วิจัยสามารถทราบเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางของ CdS ในปริมาณสูง โดยวิธีเคมี-แสง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีเฟสเดียว มีเกรนขนาดใหญ่ผิวเรียบ เนื่อแน่นสม่ำเสมอ โปร่งแสง ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการเตรียมฟิล์มบางของ CdS เคลือบบนสารกึ่งตัวนำ CuInGaSe_2 ให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหั่วต่อ CdS/CuInGaSe_2
2. ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ CdS/CuInSe_2 และ CdS/CuInGaSe_2 ทั้งเชิงวิชาการ และการประยุกต์ต่อไปในอนาคต
3. ได้ผลงานวิจัยที่สามารถส่งตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ
4. ได้พัฒนาการวิจัยของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่ร่วมในโครงการ

บทที่ 2

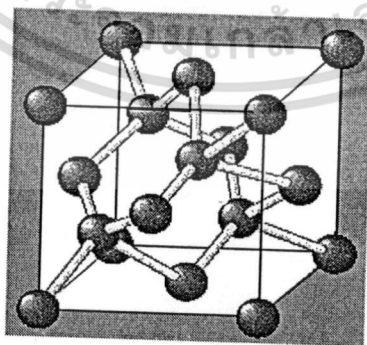
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์

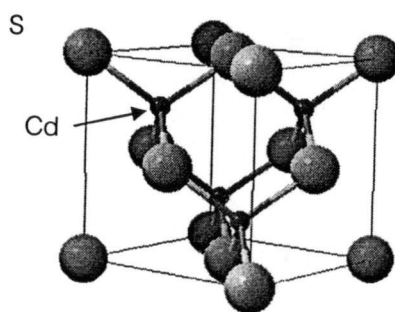
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมี การจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์ (cubic zinc sulfide structure or zincblende) และ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวอร์ทไซต์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์ [5-6]

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.1 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral bond) แต่จะต่างกับที่โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกย่อย (sublattice) แบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattices) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S ส่วนกรณีสารละลายของแข็ง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ นั้นอะตอมของ Zn จะจัดเรียงตัวแบบสุ่มอยู่ในตำแหน่งอะตอมของแคดเมียม ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS , CuCl , AgI , InAs , SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



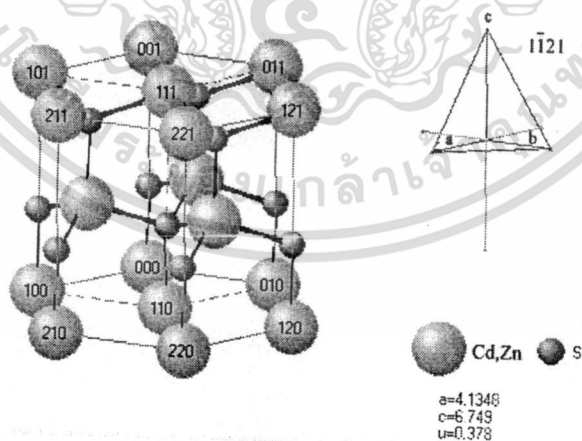
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของ CdS

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซด์ [5-6]

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีการจัดเรียงอะตอมเหมือนกับ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ แต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงระนาบของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไป โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำโครงสร้างย่อยแบบ เฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal closed-packed) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกนซี (c-axis) โดยที่หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ Cd และ S โดยที่สำหรับกรณีสารละลายของแข็ง CdS นั้น อะตอมของ Zn จะจัดเรียงตัวแบบสลับอยู่ในตำแหน่งอะตอมของ Cd ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnS, ZnO, ZnSe, ZnTe, SiC, CdSe และ CdS เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ของ CdS

2.1.3 ดัชนีมิลเลอร์

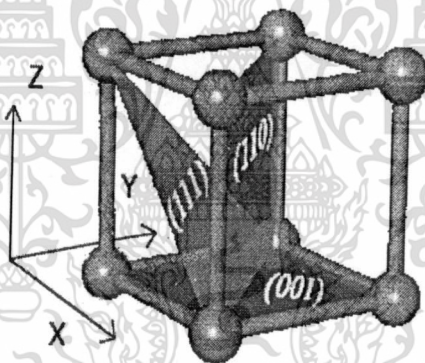
การบอกระนาบต่าง ๆ ในผลึกนั้น จะบอกเป็นค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าดัชนีมิลเลอร์หาได้จากส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก ผู้เสนอคือนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ มิลเลอร์ (Miller) โดยการแยกพิจารณาดัชนีมิลเลอร์เป็นสองประเภทดังนี้คือ

ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

การบอกระนาบต่าง ๆ ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะใช้ดัชนีมิลเลอร์ ที่แทนด้วยเลขจำนวนเต็มสามจำนวนคือ h, k, l โดยใช้สัญลักษณ์ (hkl) และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.4 เราจะได้

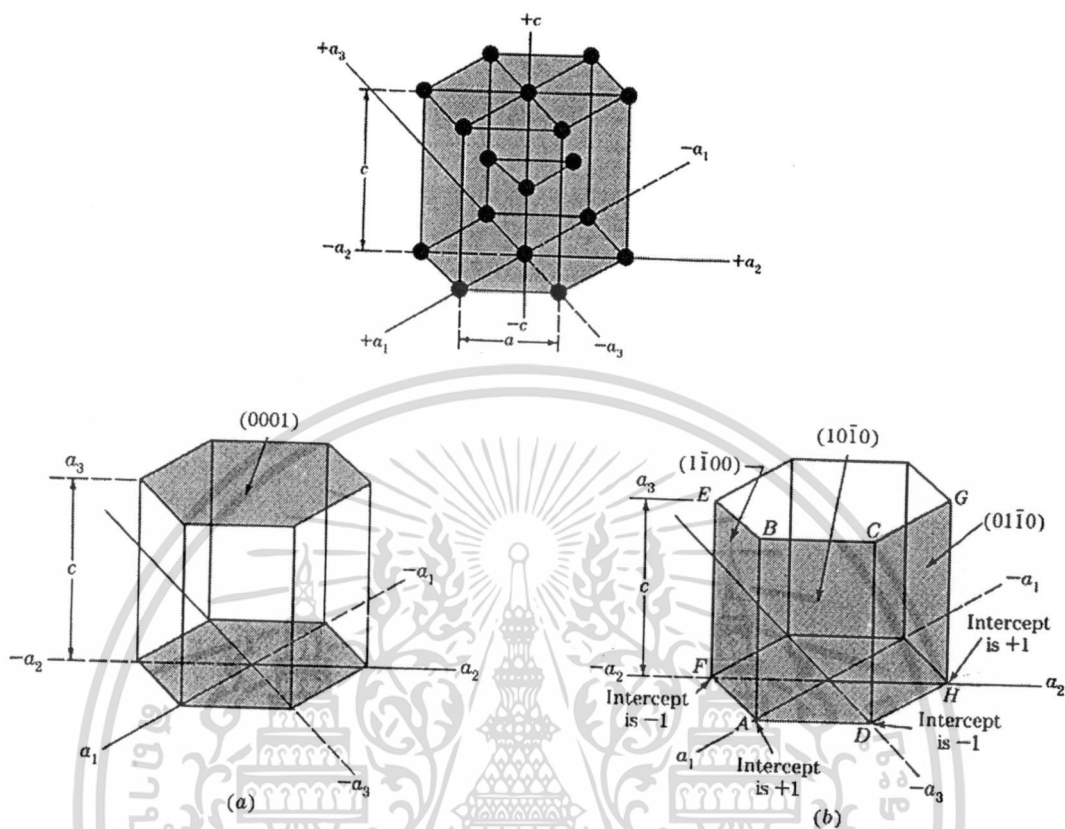
$$h:k:l = 1/p:1/q:1/r \quad (2.1)$$

เมื่อ p, q และ r คือ จุดตัดแกนซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่ระนาบตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ นั่นคือ h, k, l จะเป็นส่วนกลับของระยะตัดแกนผลึก a, b, c ตามลำดับ ซึ่งก็คือดัชนีมิลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล



รูปที่ 2.5 แสดงดัชนีมิลเลอร์ของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

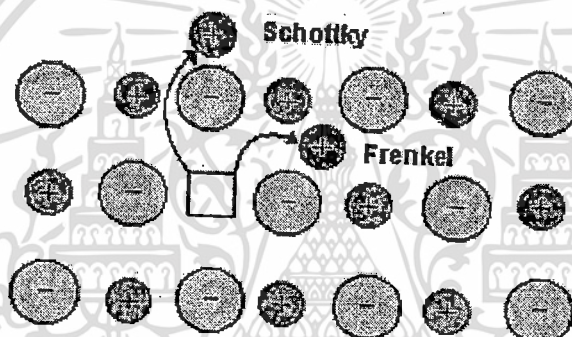
ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล ดัชนีที่ใช้เรียกระนาบคือ ดัชนีมิลเลอร์-บราว ใช้สัญลักษณ์ h, k, i, l ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากส่วนกลับของระยะที่ระนาบที่พิจารณาตัดแกน a_1, a_2, a_3 และ c ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 โครงสร้างของหน่วยเซลล์ประกอบด้วยระนาบ 2 แบบ คือ

1) ระนาบฐานมีสองระนาบคือระนาบบน และระนาบฐานล่าง แกน a_1, a_2, a_3 เป็นแกนที่อยู่ในระนาบฐานทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน และระยะตัดแกน $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$ และแกนที่ 4 คือแกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้งสอง ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะหนึ่งหน่วย ส่วนกลับของระยะตัดแกนทั้งสี่จึงเท่ากับ $0, 0, 0, 1$ ดังนั้นดัชนีมิลเลอร์-บราว ก็คือ (0001)

2) ระนาบปริซึมมีหกระนาบหรือหน้า ระนาบปริซึมทุกระนาบในหน่วยเซลล์สามารถแทนด้วยดัชนีเดียวกันคือ (1010) ในการเรียกชื่อระนาบอาจจะระบุด้วย (hkl) ก็ได้คืออาศัยเพียง h, k, l โดยที่ $h + k = -i$ แต่การระบุด้วย $(hkil)$ จะแสดงความสมมาตรในหน่วยเซลล์ได้ชัดเจนกว่า

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก [5]

การเกิดข้อบกพร่องผลึก (defect crystal) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่าง ๆ ในผลึกจริงจะมีข้อบกพร่องผลึกหลายชนิด เช่น ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect) ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนเคนซี (vacancy defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดไปจากโครงผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.6 ข้อบกพร่องผลึกแบบซัปสติติวชันนัล (substitutional defect) เป็นข้อบกพร่องที่มีการแทนที่อะตอมในโครงสร้างผลึกเดิม ข้อบกพร่องแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) เป็นข้อบกพร่องแบบที่มีอะตอมไปแทรกในบริเวณที่ควรเป็นที่ว่างของผลึก เป็นต้น ข้อบกพร่องแบบเชิงเส้น (line defect) เช่น สลิป (slip) เป็นข้อบกพร่องที่ระนาบของอะตอมเลื่อนไถลไป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) เป็นข้อบกพร่องที่มีระนาบของสลิปตั้งฉากกับทิศทางการไถลของสลิป ข้อบกพร่องแบบดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) คือข้อบกพร่องผลึกแบบที่ระนาบสลิปขนานกับทิศการไถลของสลิป



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึก

2.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [7]

2.1.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 ถึง 0.25 nm เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับเกรตติงก็จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น และหลังจากผ่านโครงสร้างผลึกออกมา ก็จะมีการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ แบริก (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และเรียกกฎนี้ว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ

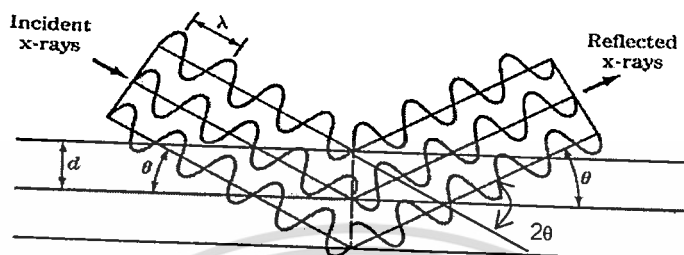
$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.2)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน

θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนทำกับระนาบของผลึก

n คือ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

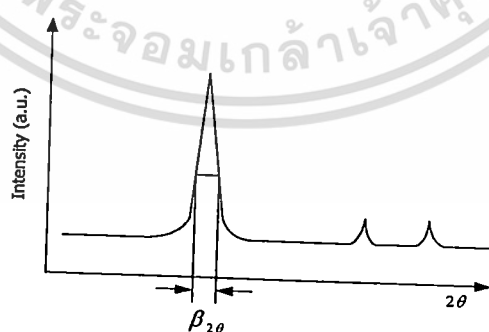


รูปที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึก

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ระนาบต่าง ๆ ของผลึก แล้วเกิดการแทรกสอดแบบเสริม คือความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนมีค่ามาก สังเกตได้จากพีคของการเลี้ยวเบนจะสูง สำหรับธาตุหรือสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน พีคของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น จะเกิดที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ โดยมุมเลี้ยวเบนคือ มุมระหว่างรังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบซึ่งมีค่า 2θ โดยความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนกับมุมของการเลี้ยวเบนจะวัดได้จากเครื่อง ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์

2.1.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก และขนาดของเกรนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ได้ออกมาจากผลึก และการหาขนาดของเกรน

จากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สามารถนำไปคำนวณหาค่าขนาดของเกรน(Crystal size) ได้จากสมการ

$$d = \frac{\lambda}{D \cos \theta} \quad (2.3)$$

เมื่อ d = ขนาดของเกรน

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

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

θ = มุมที่พีคสเปกตรัม

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างแบบคิวบิก

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยที่ $a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าดัชนีมิลเลอร์และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันดังสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) \quad (2.4)$$

แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2.5)$$

โดยที่ a = ค่าคงที่ของผลึก

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

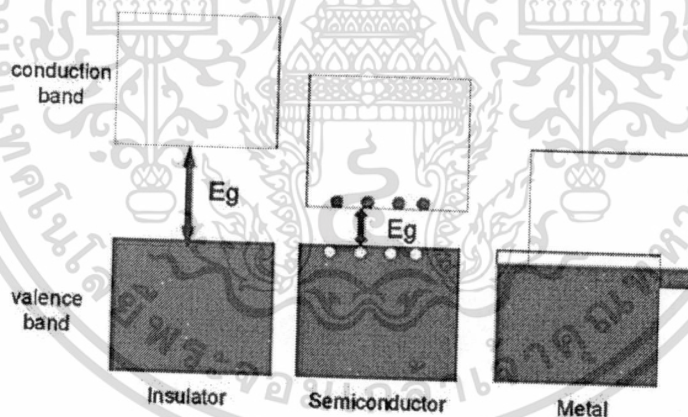
โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล โดยมีค่าต่างๆ $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.6)$$

2.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [5,8]

2.2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

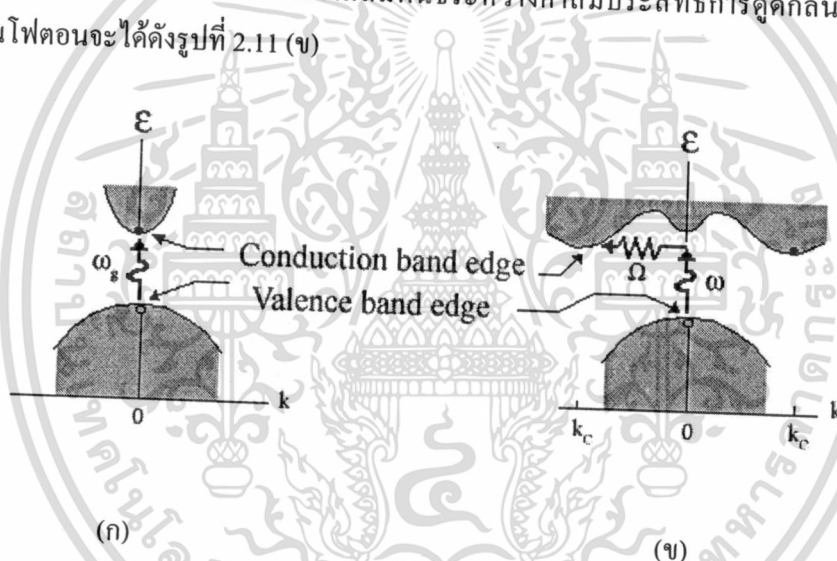
โดยทั่วไป มักนิยมใช้ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน ในการแบ่งแยกชนิดของสารต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินซิก (intrinsic) ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือตัวนำเป็นต้น ลักษณะของโครงสร้างพลังงานแบบง่ายแสดงดังรูป 2.9 ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำ (conduction band) ซึ่งในแถบวาเลนซ์สำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้อง และสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาเคลวิน จะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและมีแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ยึดเหนี่ยวอะตอมเอาไว้ ส่วนตัวนำจะยังคงมีที่ว่างอยู่เล็กน้อย ในส่วนของแถบนำซึ่งจะว่างสำหรับฉนวนที่อุณหภูมิห้องและสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ส่วนตัวนำจะมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บางส่วนแล้ว ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่เลยและเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณต้องห้าม หรือแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) ซึ่งจะเรียกความกว้างของช่องนั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ขนาดของ E_g จะถูกนำมาใช้แบ่งแยกชนิดสารต่าง ๆ นั้นเอง เช่น ฉนวนจะมี $E_g > 3\text{eV}$ สารกึ่งตัวนำจะมี $E_g < 3\text{eV}$ และตัวนำไม่มีค่า E_g เพราะมีค่าแถบวาเลนซ์และแถบนำซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เป็นต้น ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะเรียกว่า ขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge หรือ band edge) ซึ่งบอกขนาดด้วยค่า E_g นั้นเอง



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของสารชนิดต่าง ๆ ที่เป็นอินทรินซิก

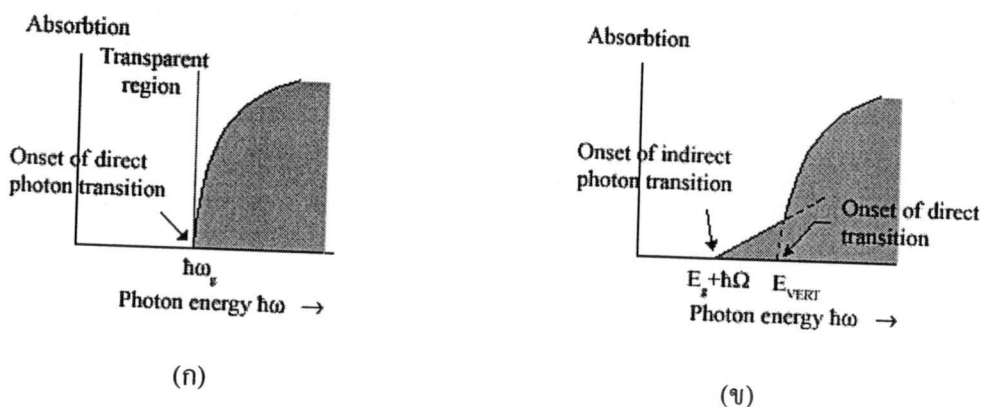
ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่า กับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่

โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.11(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{vert}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.2.2 การเกิดสีของผลึก

นอกจากนี้ค่า E_g ยังเป็นตัวที่กำหนดคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของสาร ตลอดจนการมีสีของผลึกอีกด้วย การมีสีของผลึกมีสาเหตุเกิดมาจากการที่เมื่อให้พลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ E_g ($h\omega \leq E_g$) ตกกระทบผลึก อิเล็กตรอนไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อที่จะย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้ หรืออิเล็กตรอนไม่ถูกกระตุ้นนั่นเอง ดังนั้นพลังงานโฟตอนในย่านความยาวคลื่นนั้นจะถูกส่งผ่าน (transmitted) ออกจากผลึก ทำให้เราสามารถมองเห็นผลึกมีสีตามย่านความยาวคลื่นนั้น เช่น ผลึก CdS จะมีสีเหลืองส้ม เนื่องจากมีค่า $E_g = 2.4\text{ eV}$ อิเล็กตรอนจึงดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตจนถึงสีน้ำเงิน หรือเขียว และส่งผ่านพลังงานโฟตอนที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับสีเหลืองออกมาหมด และเนื่องจากขนาดของขอบการดูดกลืนพื้นฐานหรือขนาดของ E_g มีค่าสอดคล้องกับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดความยาวคลื่นใกล้เคียงกับสีเหลืองส้ม เราจึงมองเห็นผลึก CdS มีสีเหลืองส้มเป็นต้น

2.2.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงาน จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มีมากกว่าแถบว่างพลังงาน การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากยอดสูงสุดของแถบพลังงานวา

เลนซ์ไปยังแนวตั้งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำ ซึ่งเรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองแบบ คือ การย้ายสถานะพลังงานพลังงานชนิดินยอม และแบบต้องห้าม โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นกับค่า ออฟติคอลเมตริกอิเลเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้าย สถานะพลังงานชนิดินยอม

เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ เราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานทั้งแบบยินยอมและแบบต้องห้ามได้ดังนี้

การย้ายสถานะพลังงานชนิดินยอมแบบตรง

$$\begin{aligned} (\alpha h\nu) &= \frac{sc\hbar}{n} \left[\frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \\ &\equiv A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$\begin{aligned} (\alpha h\nu) &= \frac{sc\hbar}{n} \left[\frac{2\mu}{\hbar^2} \right]^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(0)|_{k=0}^2 (h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \\ &\equiv A'(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่ μ คือ มวลลดทอน (The reduced electron - hole mass)

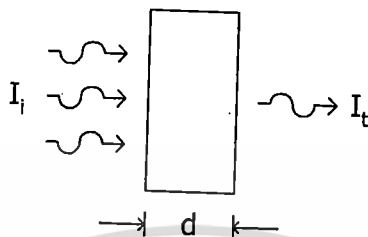
H_{cv} คือ ค่าออฟติคอลเมตริกอิเลเมนต์ (The optical matrix element) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

2.2.4 การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

สำหรับการทดลองเราสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านแสงของสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ส่งผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

ค่าการสะท้อนและการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{(1 - R^2 e^{-2\alpha d})} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (2.10)$$

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

R คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I_t คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

I_i คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน

n คือ ดัชนีหักเห

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (2.9) จะเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \tag{2.11}$$

ในการทดลองของการดูดกลืนแสงนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการ (2.11) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_i}{I_t} \right) + \text{ค่าคงที่} \tag{2.12}$$

ค่าคงที่ในสมการ (2.12) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนที่ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (α_0) และต้องนำค่านี้มาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยัง แถบนำเท่านั้น

2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [9]

จากทฤษฎีแถบพลังงาน สารกึ่งตัวนำมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 eV พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า

ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุยาว l มีพื้นที่ภาคตัวขวาง A จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า E ดังสมการ

$$V = El \tag{2.13}$$

และมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดย

$$I = nqv_d A \tag{2.14}$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหาได้จาก

$$J = \frac{I}{A} = nqv_d = nq\mu E \tag{2.15}$$

เมื่อ	n	คือ	ความหนาแน่นของพาหะ
	q	คือ	ขนาดประจุไฟฟ้า
	v _d	คือ	อัตราเร็วของพาหะ
	μ	คือ	สภาพคล่องตัว
	E	คือ	ค่าสนามไฟฟ้า

โดยที่ $v_d = \mu E$ และจากกฎของโอห์ม $I = V/R$ และ $J = \sigma E$ เทียบกับสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) จะได้

$$\sigma = \frac{l}{RA} \tag{2.16}$$

และ $\sigma = nq\mu \tag{2.17}$

สำหรับในสารกึ่งตัวนำการนำไฟฟ้าจะเกิดจากพาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮล ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าเขียนได้เป็น

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \tag{2.18}$$

โดยที่ n เป็นจำนวนของอิเล็กตรอน และ p เป็นจำนวนของโฮล และจากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า $\sigma = 1/\rho$ ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)} \tag{2.19}$$

หรือเทียบกับสมการที่ (2.15) จะได้

$$R = \frac{\rho l}{A} \tag{2.20}$$

ถ้า $n \gg p$ จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

$$\rho = \frac{1}{q \mu_n n} \quad (2.21)$$

2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

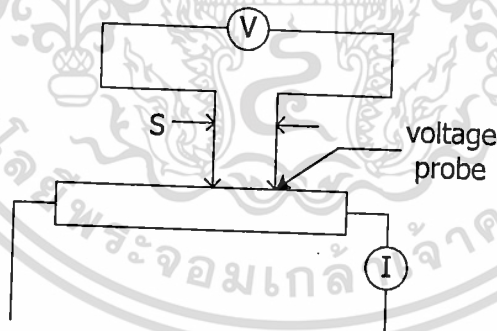
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมีหลายวิธีด้วยกัน ในการทดลองนี้เราจะใช้วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าหลัก ๆ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probe) และวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe)

2.3.2.1 วิธีวัดตรง

เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้วัดค่าความต้านทานคือวัดความต่างศักย์ (V) คร่อมตัวต้านทานนั้นพร้อมทั้งวัดกระแส (I) ที่ผ่านตัวต้านทานนั้นแล้วจะได้ค่าความต้านทาน (R) มีค่าเท่ากับ $\frac{V}{I}$ วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่ความต้านทานที่วัดได้นี้มีความต้านทานที่จุดต่อขั้วไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย แต่สามารถลดค่าความต้านทานที่เพิ่มเข้ามาได้โดยทำการปรับค่าโวลต์เตจที่จ่ายให้กับตัวต้านทานขึ้นอีกหลายค่า แล้วนำค่าโวลต์เตจมาเขียนกราฟกับค่าความต้านทานที่คำนวณได้จะพบว่าค่าความต้านทานจะค่อยๆ ลดลงและจะคงที่ในที่สุดและค่าความต้านทานที่คงที่นี้คือค่าที่ใกล้เคียงค่าจริงที่สุด

2.3.2.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัดโดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่างทั้งสอง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนามาจากชนิดแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถที่จะตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสองขั้วเชิงเส้น

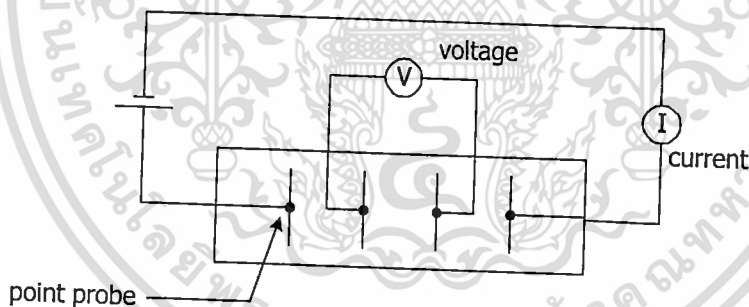
ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรอยู่

ห่างจากจุดที่ต้องการปล่อยกระแสเข้าและกระแสออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณวัดนี้ จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะส่วนน้อยบริเวณตัววัดนั้น ทำให้การวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ไฟฟ้า (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่า เส้นต่างๆของศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่เปลี่ยนกระแสเข้าและกระแสออก จะต้องมากกว่าสามเท่า ($V/a > 3$ เมื่อ I คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า a คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส) ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการคือ โครงสร้างทางผลึกควรมีโครงสร้างชนิดใด

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้ จะสามารถแยกความต้านทานจำเพาะที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และ ความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.3.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.14 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ส่วนใหญแล้วมักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น(sheet resistance) ซึ่งมีหน่วยเป็น $\Omega / \square$



รูปที่ 2.14 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาฟิล์มยาว l กว้าง w และหนา d ตามรูปที่ 2.15 จากกฎของโอห์มและใช้สมการที่ (2.19) จะคำนวณหาความต้านทานของฟิล์มบางได้ดังนี้

$$R = V/I = \rho \frac{l}{A}$$

$$= \rho \frac{\ell}{wd} \quad \Omega \quad (2.22)$$

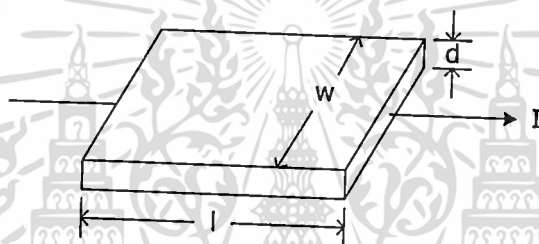
ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ($\ell = w$) ดังนั้นสมการที่ 2.21 เขียนใหม่ได้เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \quad \Omega / \square \quad (2.23)$$

R_s คือ ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

โดยหน่วยของความต้านทานแผ่นจะแทน Ω ด้วย $\Omega / \square$ เพื่อให้เกิดความแตกต่าง



รูปที่ 2.15 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

จากรูปที่ 2.15 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใด ๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right] \quad (2.24)$$

โดยที่ s คือช่องว่างระหว่างขั้ว ในกรณีที่ $s_1 = s_2 = s_3$ สมการที่ (2.23) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.25)$$

บทที่ 3

หลักการการเกิดฟิล์มบางด้วยวิธีเคมี-แสง

ฟิล์มบาง CdS ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CdTe และ CdS/CuInGaSe₂ ฟิล์มบาง CdS โดยส่วนมากเตรียมได้จากหลายวิธี เช่น การระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ, วิธีสปีดเทอริง หรือสเปร์ไฟโรไลซิส นับตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา วิธีอาบสารละลายเคมีได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ให้เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว และนอกจากวิธีอาบสารละลายเคมีแล้วยังมีวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยไฟฟ้าที่ได้รับการสนใจอย่างมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบางทั้งสองวิธีนี้เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นสารละลายเคมี เมื่อไม่นานมานี้ Ichimura และเพื่อนร่วมงาน [1- 5] ได้พัฒนาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS จากสารละลายเคมีโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นที่อุณหภูมิห้อง โดยแผ่นรองรับจะเป็นกระจกสไลด์ที่วางอยู่ใต้ผิวหน้าของสารละลายดังรูปที่ 3.1 โดยที่สารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนไทโอซัลเฟต (thiosulfate ions) และไอออนของแคดเมียม (cadmium ions) ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตไอออนไทโอซัลเฟตจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ อะตอม S จะไปรวมตัวกับอะตอม Cd เพื่อกลายเป็นสารประกอบ CdS ฟิล์มบางของสารประกอบ CdS จะเกิดขึ้นตรงบริเวณแผ่นรองรับที่ได้รับแสงอัลตราไวโอเลตเท่านั้น และตรงบริเวณที่ไม่โดนแสงก็จะไม่เกิดสารประกอบ CdS ดังนั้นกระบวนการการเตรียมฟิล์มบาง CdS จะควบคุมได้โดยการเปิดปิด หรือเปลี่ยนความเข้มแสงอัลตราไวโอเลต อีกทั้งรูปร่างของฟิล์มบางที่ต้องการทำให้เกิดขึ้นบนแผ่นรองรับยังสามารถปรับแต่งได้โดยใช้น้ำภากรูปต่าง ๆ ดังนั้นวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีเคมี-แสงนี้จึงควบคุมได้ง่ายกว่าวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า และต้นทุนต่ำกว่าวิธีอาบสารละลายเคมี

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสารละลาย เกิดขึ้นได้เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 254 nm จากหลอดไฟโปรอทที่มีความเข้มแสงประมาณ 100-200 mW/cm² แสงความยาวคลื่น 254 nm จะถูกดูดกลืนด้วยแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเป็นแผ่นรองรับฟิล์มบางอย่างสมบูรณ์ โดยไม่ทะลุผ่านออกไปทางด้านล่าง ดังนั้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเพื่อให้เป็นฟิล์มบาง CdS จะเป็นดังนี้ คือ



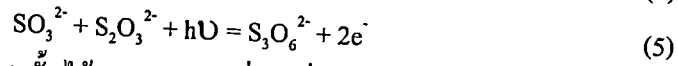
ซึ่งอะตอม S จะถูกปลดปล่อยออกมาจากไอออน S₂O₃²⁻ ในอ่างสารละลายเคมีที่มีสภาพเป็นกรด ดังความสัมพันธ์



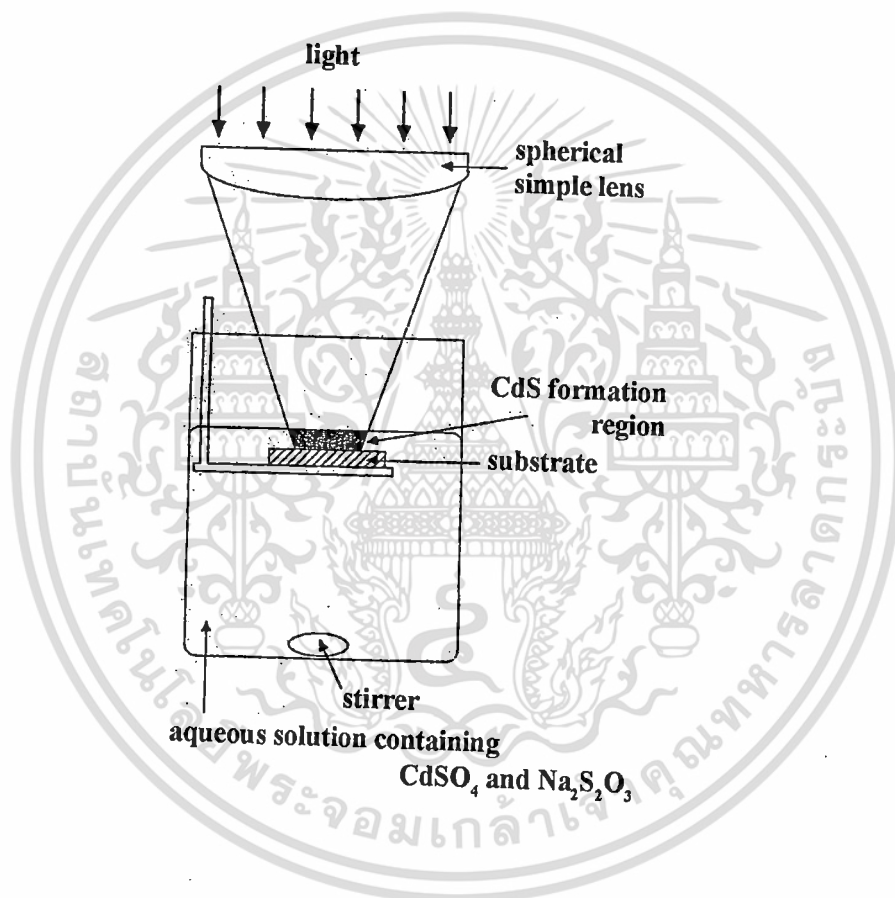
ปฏิกิริยาเคมีแสงนี้ยังสามารถดำเนินต่อไปได้ แม้ค่า pH จะมากกว่า 7 ซึ่งเราอาจพิจารณาได้ว่าไอออน $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ยังจะสลายตัวได้อีกดังสมการ



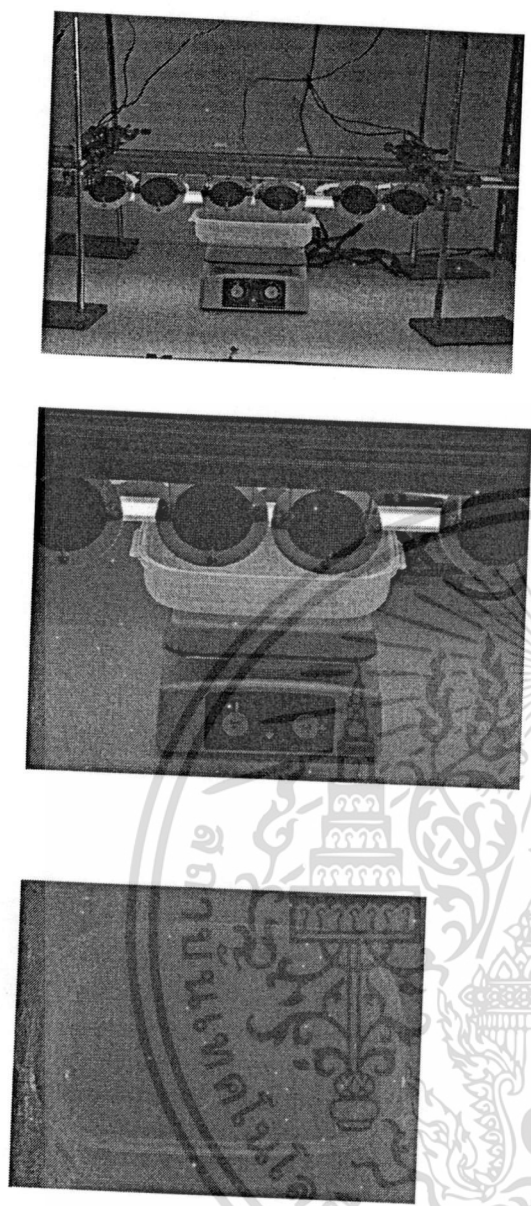
นอกจากนั้นไอออน $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ยังเป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนให้กับสารละลาย ดังสมการ



ซึ่งไอออน SO_3^{2-} ที่อยู่ในสมการ (5) นั้นได้มาจากสมการที่ (3) ที่อยู่ในสารละลายสภาวะเป็นด่าง



รูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีเคมี-แสง [2-3]



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธีเคมี- แสงในโครงการวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

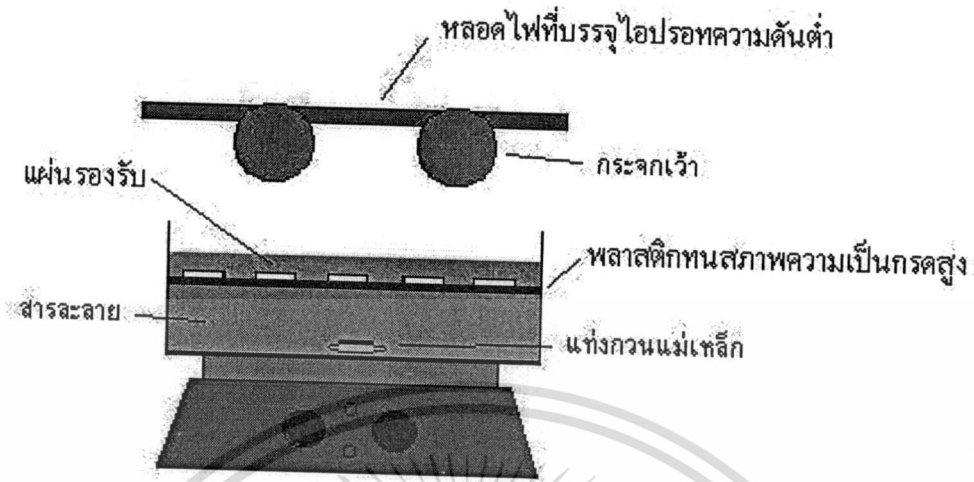
บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) ด้วยวิธีเคมี-แสง (photochemical deposition : PCD) และศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ [13] ทั้งกรณีไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งได้แก่ การศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction), การศึกษาการส่งผ่านแสง (transmittance) เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) และการหาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง (sheet resistance) โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probe) เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง

4.1 การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD [1-5]

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD อุปกรณ์ที่จำเป็นที่สุดคือ หลอดไฟไอปรอทความดันต่ำ กำลังไฟฟ้า 39 วัตต์ ซึ่งหลอดไฟที่บรรจุไอปรอทความดันต่ำนี้จะต้องให้แสงที่มีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เนื่องจากที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง โดยจะฉายแสงไปยังแผ่นรองรับโดยตรง และใช้กระจกแก้วช่วยสะท้อนแสงไปยังแผ่นรองรับอีกทางหนึ่ง เพื่อให้แสงที่ตกบนแผ่นรองรับมีความเข้มมากขึ้น โดยแผ่นรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางนี้ จะใช้แผ่นรองรับ 2 ชนิด ได้แก่ แผ่นรองรับที่เคลือบฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี (chemical bath deposition : CBD) จำนวน 2 ครั้ง และแผ่นรองรับที่เป็นกระจกใสที่ทำกรัดด้วยกรด HF เข้มข้น โดยแผ่นรองรับจะวางบนฐานรองพลาสติกทนสภาพความเป็นกรดที่อยู่ในภาชนะเตรียมสารที่มีสารละลายอยู่ และใช้แท่งกวนแม่เหล็กในการกวนสารละลายตลอดเวลาระหว่างการเคลือบฟิล์มบาง อุปกรณ์การทดลองจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ได้แก่ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้จะเทลงในภาชนะเตรียมสารที่เติมน้ำปลอดประจุจนมีปริมาตรของสารละลายเป็น 400 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้จะแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เมื่อผสมสารตั้งต้นเสร็จแล้ว จะต้องทำให้สารละลายมีค่า $\text{pH} = 3.0$ โดยการเติมกรด H_2SO_4

ตารางที่ 4.1 แสดงความเข้มข้นและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 400 มิลลิลิตร

อัตราส่วน ความเข้มข้น Cd : S	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น		ปริมาณของสารตั้งต้น	
	$\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$ (M)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (M)	$\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$ (g)	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (g)
1 : 1	0.002	0.002	0.20376	0.29844
1 : 5	0.002	0.01	0.20376	0.99223
1 : 10	0.002	0.02	0.20376	1.98446
1 : 30	0.002	0.06	0.20376	5.95336
1 : 50	0.002	0.1	0.20376	9.92232

4.2 การเตรียมแผ่นรองรับ [11-13]

แผ่นรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางในโรงงานพิเศษนี้ จะมี 2 ประเภท ได้แก่ แผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง Cds ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ซึ่งแผ่นรองรับนี้จะใช้กระจกสไลด์ที่มีขนาดความกว้างและความยาวเป็น 12 และ 25 มิลลิเมตรตามลำดับ

4.2.1 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

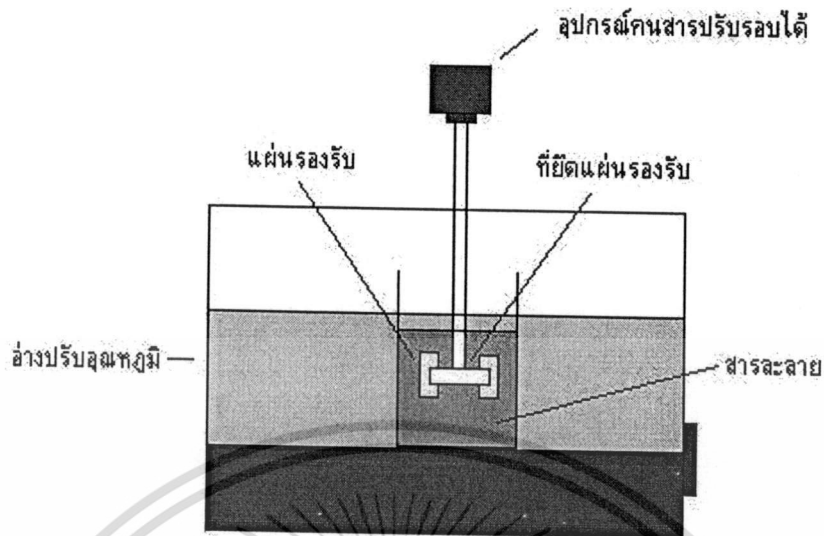
ในการเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการกัดด้วยกรด HF เข้มข้น มีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย TCE เพื่อขจัดคราบไขมัน
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย อะซีโตน เพื่อขจัด TCE
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย เอทานอล เพื่อขจัดอะซีโตน
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรด HF เข้มข้น เป็นเวลา 8 นาที แล้วล้างด้วยน้ำป้อนคประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำป้อนคประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว ก็จะได้แผ่นรองรับที่ทำการกัดด้วยกรด HF เข้มข้น เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธี PCD ต่อไป

4.2.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง Cds ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ [11-13]

ในการเคลือบฟิล์มบาง Cds โดยวิธี CBD อุปกรณ์ที่ใช้ยึดแผ่นกระจกสไลด์ คือ เทฟลอน โดยเทฟลอนที่ใช้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก นำมาตัดเป็นแวนหนาประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วนำมาเจาะเป็นร่องประมาณ 8 – 15 ร่อง ขึ้นอยู่กับขนาดของเทฟลอน เพื่อใช้สำหรับเสียบแผ่นกระจกสไลด์ให้อยู่ในลักษณะแนวดิ่ง โดยเทฟลอนจะถูกยึดด้วยแท่งแก้วตันที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ เพื่อหมุนแผ่นสไลด์ในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มบาง และอุปกรณ์ที่จำเป็นอีกอย่างหนึ่ง คือ อ่างน้ำ (bath) ซึ่งอ่างน้ำที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 100°C นอกจากนี้ยังมีเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อใช้ในการกำจัดตะกอนที่ไม่ต้องการที่ติดบนฟิล์มที่ได้จากการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธี CBD จะแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD ได้แก่ $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ และ NH_3 (25%) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 , 0.05 และ 1.5 M ตามลำดับ โดยจะเทสารตั้งต้นทั้งหมดลงในบีกเกอร์ร่วมกับน้ำปอดประจุ จนมีปริมาตรของสารละลายเป็น 150 มิลลิลิตร โดยปริมาตรสารตั้งต้นที่ใช้มีค่าตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD ที่มีปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 150 มิลลิลิตร

สารตั้งต้น	ปริมาณ
$\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$	0.3847 กรัม
$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$	0.5709 กรัม
NH_3 (25%)	16.8 มิลลิลิตร

โดยแผ่นรองรับที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD มีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย TCE
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย อะซีโตน

4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วย เอทานอล
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรด HF 10 % เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว จึงนำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้นี้ไปทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD ซึ่งขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$, $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ และ NH_3 (25%) ตามปริมาณที่ได้คำนวณไว้แล้วตามตารางที่ 6.2
2. นำแผ่นรองรับเรียบในร่องของเทฟลอน ซึ่งติดอยู่กับมอเตอร์ ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปอดประจุ 150 มิลลิลิตร ที่แช่อยู่ในอ่างน้ำที่มีอุณหภูมิ 80 °C
3. ละลายสารตั้งต้นทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วเทสารละลายที่ได้ลงในบีกเกอร์ที่มีแผ่นรองรับอยู่ โดยให้สารละลายท่วมแผ่นรองรับ แล้วหมุนแกนยึดแผ่นรองรับด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 60 รอบต่อนาที
4. ทำการวัดค่า pH ของสารละลายในบีกเกอร์ ซึ่งจะมีค่าประมาณ 11.6 แล้วปล่อยทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง โดยควบคุมให้อัตราการหมุนของแท่นยึดแผ่นรองรับ และอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลา
5. หลังจากเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง นำแผ่นรองรับที่ติดอยู่กับแท่นยึดออกจากสารละลาย จะปรากฏเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ และมีอนุภาคของ CdS บางส่วนที่จับตัวกันเป็นก้อนเล็กๆ กลายผงฝุ่นเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง
6. นำแผ่นรองรับที่มีฟิล์มบาง CdS เคลือบอยู่ใส่บีกเกอร์ที่มีน้ำปอดประจุอยู่ โดยให้น้ำปอดประจุท่วมแผ่นรองรับ แล้วนำไปแช่ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ใช้เวลาประมาณ 15 นาที แล้วเปลี่ยนน้ำปอดประจุใหม่ แล้วทำการแช่ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้งประมาณ 20 นาที หรือแช่จนฟิล์มบางสะอาด
7. นำฟิล์มบางที่ได้มาเคลือบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ตามขั้นตอนที่ 1 – 7
8. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

เมื่อทำการเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์แล้ว จะได้แผ่นรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ต่อไป

4.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD [1-5]

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ได้มีการทดลองหาเงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD มีดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ตามตารางที่ 6.1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ
2. จัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 6.1 โดยให้แสงจากหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำฉายลงบนแผ่นรองรับให้ได้แสงที่มีความเข้มมากที่สุด
3. นำแผ่นรองรับวางเรียงกันในแนวนอนบนฐานรองพลาสติกทนสภาพความเป็นกรดที่วางในภาชนะเตรียมสาร ซึ่งมีแท่งกวนแม่เหล็กวางอยู่ เพื่อใช้ในการกวนสารละลาย แล้วเติมน้ำปลอดประจุประมาณ 400 มิลลิลิตร ลงในภาชนะเตรียมสาร จัดฐานรองให้ผิวด้านบนของแผ่นรองรับอยู่ต่ำกว่าระดับของน้ำปลอดประจุประมาณ 3 มิลลิเมตร
4. เทสารตั้งต้นทั้งหมดที่ชั่งไว้ลงในภาชนะเตรียมสาร แล้วเปิดเครื่องกวนแม่เหล็ก
5. หยดกรด H_2SO_4 18 หยดในสารละลาย ซึ่งจะทำให้สารละลายมีค่า pH ประมาณ 3 เมื่อหยดกรด H_2SO_4 แล้ว ให้รีบเปิดหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำทันที เนื่องจากกรด H_2SO_4 จะทำปฏิกิริยากับสารละลายทันที แล้วปล่อยทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง โดยกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็กตลอดเวลา
6. เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ให้ปิดหลอดไฟไอปรอทความดันต่ำ จะได้ฟิล์มบาง CdS เคลือบบนแผ่นรองรับ
7. นำฟิล์มบางที่ได้มาทำการเคลือบซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 – 6 เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนามากขึ้น โดยแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ให้ทำการเคลือบ 3 ครั้ง ส่วนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ให้ทำการเคลือบจำนวน 6 ครั้ง
8. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทุกอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

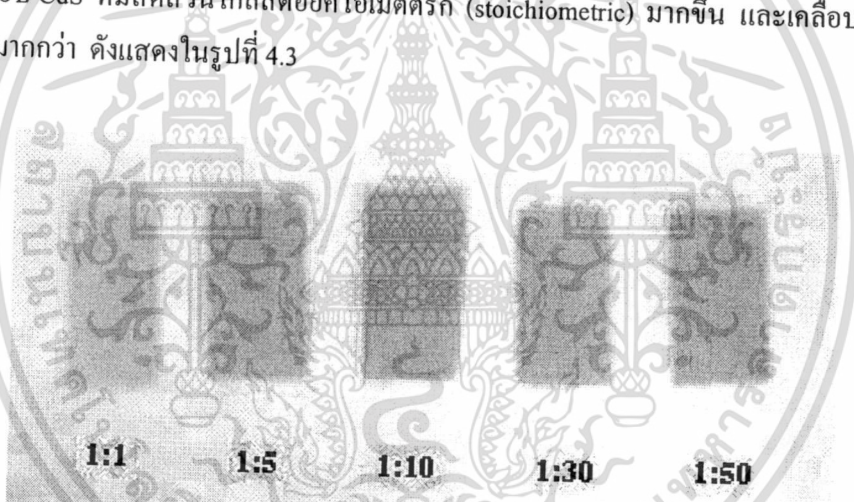
9. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ Brucker D8 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน $\text{CuK}\alpha$ มีค่าเท่ากับ $1.5418 \text{ \AA}$ ความต่างศักย์ 40 kV และกระแสไฟฟ้า 40 mA
10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและวัดความหนาของฟิล์มบาง โดยการถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 โดยใช้กระแส $300 \mu\text{A}$ ความต่างศักย์ 25 kV กำลังขยาย $50,000$ เท่า โดยเคลือบทองคำบนฟิล์มตัวอย่าง และศึกษาคุณสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อหาองค์ประกอบของอะตอมของธาตุต่างๆในฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค EDS
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี - วิสลิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV / visible spectrometer JUSCO 7600) โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง $400 - 1100$ นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบางด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่ความเข้มแสงประมาณ $95,000$ ลักซ์ สำหรับฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ และจากหลอดไฟไอปรอทความดันสูง ที่มีกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ที่ความเข้มแสงประมาณ $21,000$ ลักซ์ สำหรับฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และกรณีที่ไม่มีการฉายแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง

4.4 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทั้งหมด 6 ครั้ง ใช้ระยะเวลาในการเคลือบครั้งละประมาณ 1 ชั่วโมง และได้มีการออกแบบชุดอุปกรณ์ให้สามารถเตรียมฟิล์มบาง CdS ได้ประมาณ 40 ชิ้นต่อ 1 ภาชนะ พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จะก่อตัวและยึดติดบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ไม่ค่อยดีนัก จึงได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของผลึก CdS ใหม่ โดยเริ่มจากการกัดผิวของแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เข้มข้นในระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อเป็นการเพิ่มจุดกำเนิดผลึก (nucleation sites) บริเวณผิวของแผ่นรองรับ และหลังจากที่เตรียมฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับที่กัดด้วยกรด HF เป็นเวลาประมาณ 8 นาที พบว่าฟิล์มบาง CdS จะค่อยๆก่อตัวหนาขึ้นตามจำนวนครั้งในการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และได้ฟิล์มบาง CdS ที่มีความเรียบสม่ำเสมอพอสมควร แต่ฟิล์มบาง

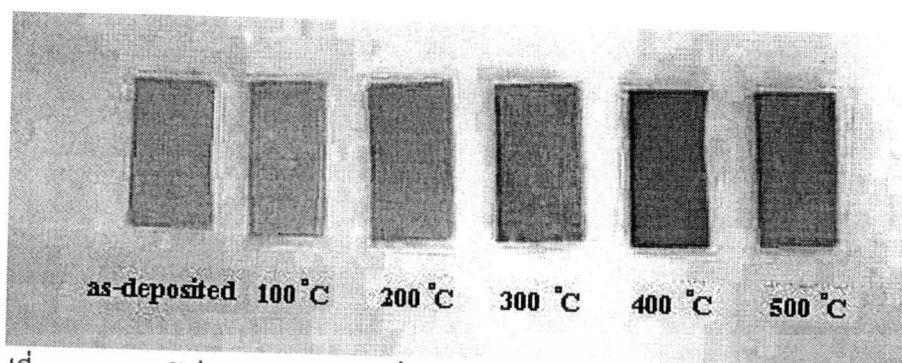
CdS ที่ได้ยังยึดเกาะอยู่บนแผ่นรองรับได้ไม่ดีเท่าที่ควร โดยฟิล์มบาง CdS แต่ละชั้นในภาชนะจะมีความหนาและความเรียบที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขของการเตรียม และเมื่อสังเกตที่ผิวของแผ่นรองรับพบว่า นอกจากจะมีฟิล์มบาง CdS แล้วยังมีผงตะกอน CdS เกิดขึ้นอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยเช่นกัน และเรายังสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากพลังงานแสงนั้น อะตอมของ Cd และ S ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีน่าจะมีการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลของสารประกอบ CdS ขึ้นมาก่อนแล้วจึงตกลงไปเคลือบบนผิวของแผ่นรองรับ และในกรณีที่เป็นตะกอนก็เช่นเดียวกัน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบโฮโมจีเนียส [15]

หลังที่เราได้เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ได้ทำการทดลองเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นคือ CdSO_4 กับ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ให้มีอัตราส่วนของปริมาณ Cd : S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มีความหนาและความเรียบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อเป็นกรณีที่อัตราส่วนที่มีความแตกต่างระหว่าง Cd : S มาก จะได้ฟิล์มที่มีความหนามากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีอะตอมของ S มากกว่าจึงมีโอกาสรวมตัวกับ Cd เป็นสารประกอบ CdS ที่มีสัดส่วนใกล้เคียงตอยกิโลเมตรริก (stoichiometric) มากขึ้น และเคลือบลงบนแผ่นรองรับได้มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1: 1, 1: 5, 1: 10, 1: 30 และ 1: 50 ตามลำดับ เมื่อไม่มีกรแอนนีส

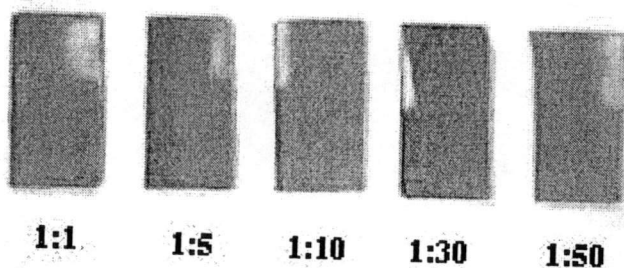
เมื่อนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าฟิล์มจะติดบนแผ่นรองรับได้มากขึ้นกว่าเดิม มีการจัดเรียงตัวของเกรนไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้นและสีของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไปจากสีเหลืองส้มเข้มขึ้นไปตามอุณหภูมิแอนนีสที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

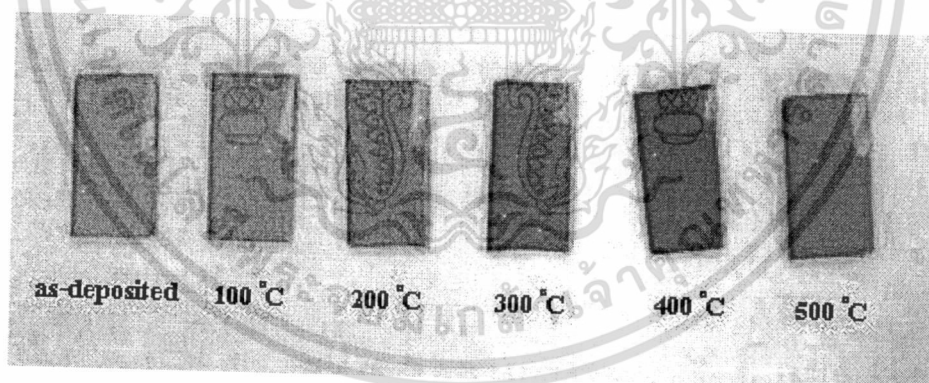
เนื่องจากฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ยังเคลือบติดอยู่บนแผ่นรองรับได้ไม่ค่อยเรียบสนิทมากนัก เนื่องจากมีพลังงานไม่มากพอในการที่จะทำให้ฟิล์มสามารถยึดติดอยู่บนแผ่นรองรับได้ดี จึงได้มีการนำฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธี CBD มาเป็นจุดกำเนิดผลึกให้กับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD ซึ่งจะทำให้การเคลือบทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 1 ชั่วโมง ผลที่ได้คือฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ สามารถยึดเกาะอยู่บนแผ่นรองรับได้ดีขึ้นและมีอัตราการเคลือบมากกว่าเดิม

นอกจากนั้นเราได้ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นสำหรับกรณีฟิล์มบางฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ให้มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 [14] ซึ่งพบว่าผลที่ได้จะเหมือนกับกรณีฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่จะต่างกันที่อัตราการเคลือบโดยที่อัตราการเคลือบของฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ จะมีค่ามากกว่ากรณีฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทั้งนี้เป็นเพราะมีฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ เป็นจุดกำเนิดผลึกอยู่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ เมื่อไม่มีการแอนนัล

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS โดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่าจะได้ผลเหมือนในกรณีฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ นั่นคือฟิล์มจะยึดติดอยู่บนแผ่นรองรับได้มากขึ้น มีการจัดเรียงตัวของเกรนไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้นและสีของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไปจากสีเหลืองส้มเข้มขึ้นไปตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

4.5 ผลจากการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เพื่อดูลักษณะของพิกที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐานของ CdS เพื่อดูว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เราเตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด

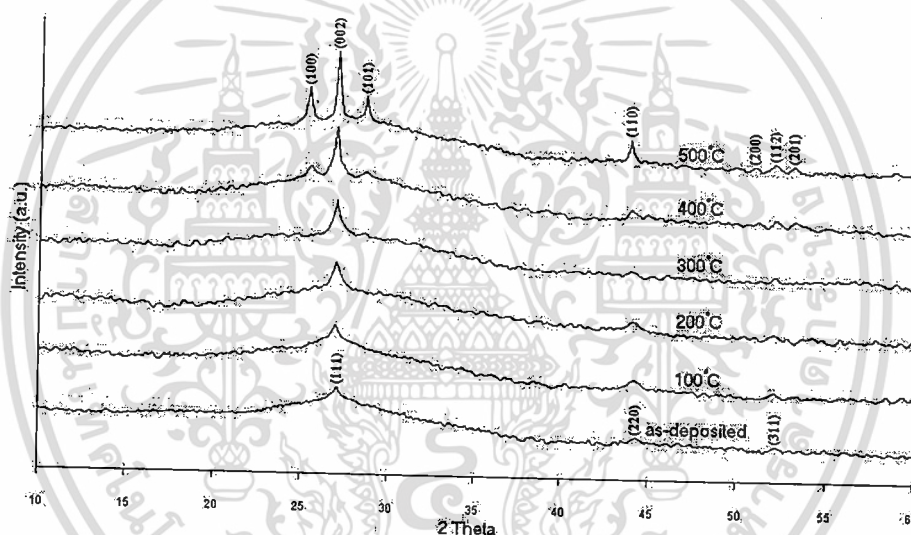
พิจารณาจากรูปที่ 4.7 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที พบว่า กรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 °C ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก ซึ่งส่วนใหญ่จัดเรียงตัวในลักษณะที่ทิศของระนาบ (111) ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ และจะเห็นพิกที่มีความเข้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น แต่อาจจะมีเฟสของเอ็กซะโกนอลอยู่บ้างแต่เชื่อว่ามีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงแสดงว่ากระบวนการการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous) จะเด่นกว่ากระบวนการการตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous) เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 400 °C สังเกตพบว่าโครงสร้างผลึกมีการเปลี่ยนเฟสเป็นแบบเอ็กซะโกนอล [2,3] โดยสังเกตได้จากพิกที่ปรากฏที่เห็นได้อย่างชัดเจนมีอยู่ 4 พิก ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากระนาบ (100), (002), (101), (110) และ (112) และเมื่อแอนนัลที่ 500 °C จะเห็นพิกดังกล่าวมีความเข้มมากขึ้นได้อย่างชัดเจน

พิจารณาจากรูป 4.8 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที พบว่า ผลการทดลองที่ได้จะเหมือนกับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่ลักษณะของพิกที่ได้นั้นจะมีความเข้มมากกว่า

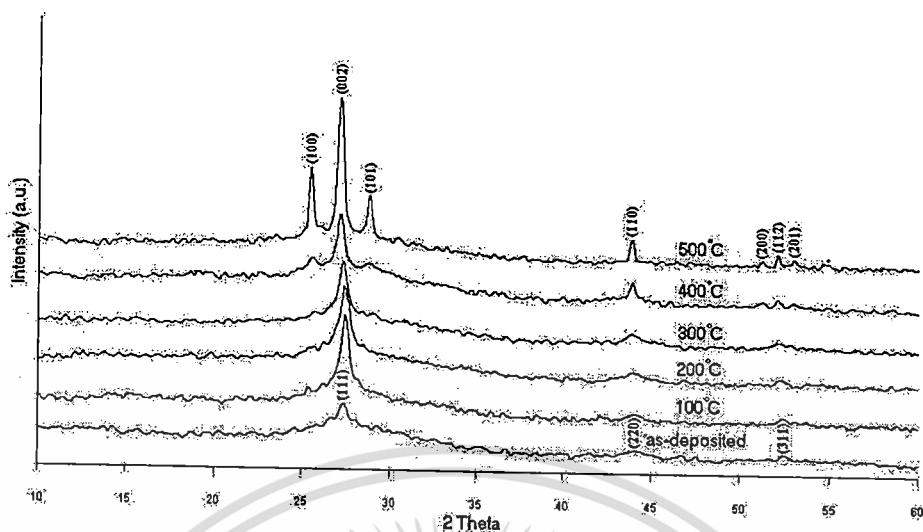
พิจารณาจากรูปที่ 4.9 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิแอนนัล 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 พบว่าที่อัตราส่วน 1:30 จะมีความเข้มของพิกชัดเจนกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จะมีขนาดของเกรนที่ใหญ่กว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ และมีการจัดเรียงตัวของระนาบไปในทิศทางเดียวกันมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ

พิจารณาจากรูปที่ 4.10 เป็นการแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิแอนนัล 100 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 พบว่า ผลการทดลองที่ได้จะเหมือนกับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิแอนนัล 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที แต่ลักษณะของพิกที่ได้นั้นจะมีความเข้มมากกว่า

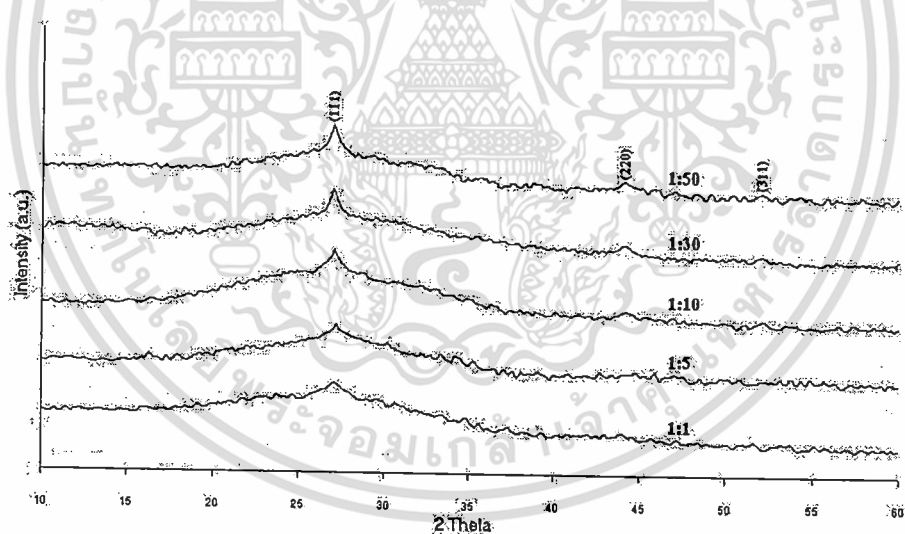
และจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CdS เราสามารถหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ โดย $a = 4.142 \text{ \AA}$ และ $c = 6.724 \text{ \AA}$ [15] และขนาดของเกรนสามารถหาได้จาก FWHM ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 16 – 93 nm ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4



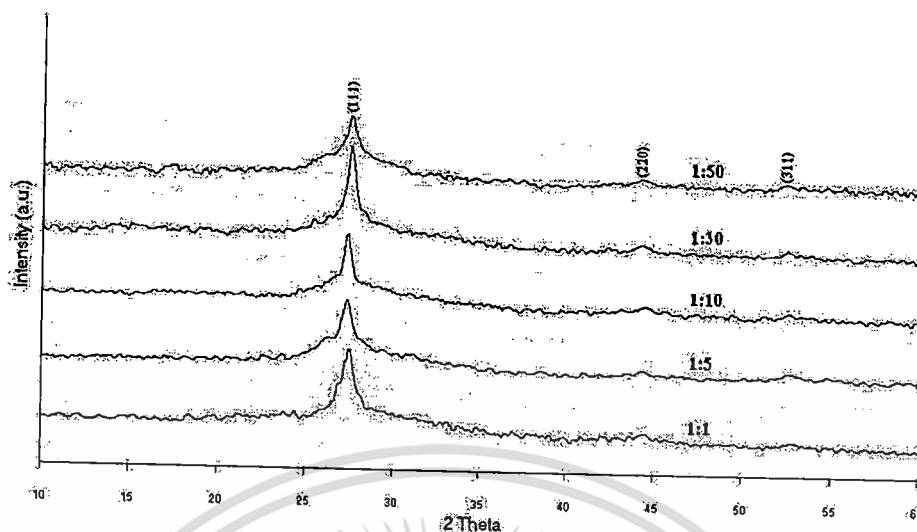
รูปที่ 4.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัล และกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกใส ที่อุณหภูมิแอนนัล 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50



รูปที่ 4.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่อุณหภูมิแอนนัล 100 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที ในกรณีแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ทุกอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เมื่อไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

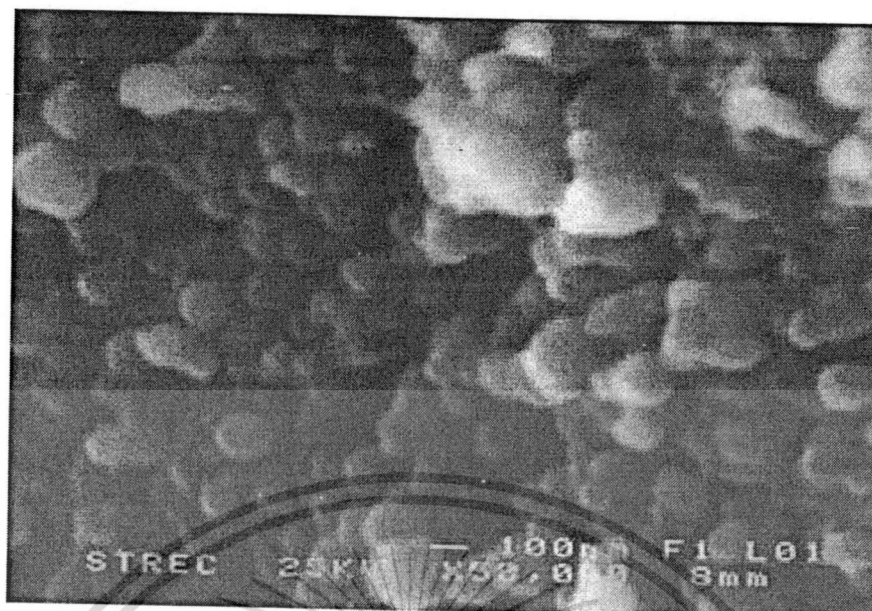
อุณหภูมิแอนนัล (°C)	ขนาดของเกรน (nm)				
	1:1	1:5	1:10	1:30	1:50
as-deposited	48	19	28	51	84
100	22	16	42	27	79
200	34	20	64	95	88
300	24	51	96	73	50
400	76	19	25	91	47
500	66	34	93	92	36

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ทุกอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เมื่อไม่มีการแอนนัล และแอนนัลที่ อุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 20 นาที

อุณหภูมิแอนนัล (°C)	ขนาดของเกรน (nm)				
	1:1	1:5	1:10	1:30	1:50
as-deposited	56	29	26	35	31
100	28	19	36	38	44
200	24	16	22	40	24
300	22	18	30	19	22
400	30	22	40	28	61
500	33	42	66	48	57

4.6 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยวิธีการถ่ายภาพ SEM และศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในฟิล์มบางด้วยวิธี EDS

จากการถ่ายภาพ SEM พบว่าเนื้อเกรนมีความหนาแน่น ลักษณะของเกรนเป็นเม็ดกลม เห็นขอบของเกรนชัดเจน ดังรูปที่ 6.11 มีขนาดของเกรนประมาณ 100 nm ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่เป็นรูพรุน (void) ด้วย สำหรับกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ลักษณะของเกรนจะมีขนาดเล็กกว่า ดังรูปที่ 4.12 และมีการยึดเกาะของเกรนดีกว่ากรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 เมื่อไม่มีการแอนนัล โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า



รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 เมื่อไม่มีการแอนนัล โดยใช้กำลังขยาย 50,000 เท่า

จากการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆในฟิล์มบางด้วยวิธี EDS จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนของปริมาณของธาตุ Cd:S ที่ได้จากวิธี EDS

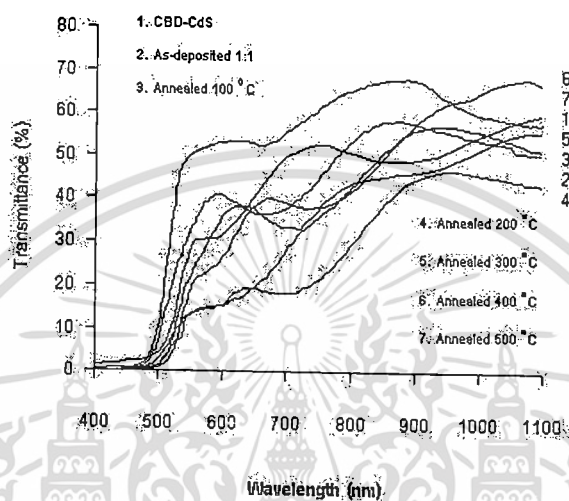
อัตราส่วนของความเข้มข้นของ Cd:S	อัตราส่วนของปริมาณของธาตุ Cd:S
1:1	1 : 0.92
1:5	1 : 1.07
1:10	1 : 1.04
1:30	1 : 0.99
1:50	1 : 1.41

4.7 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

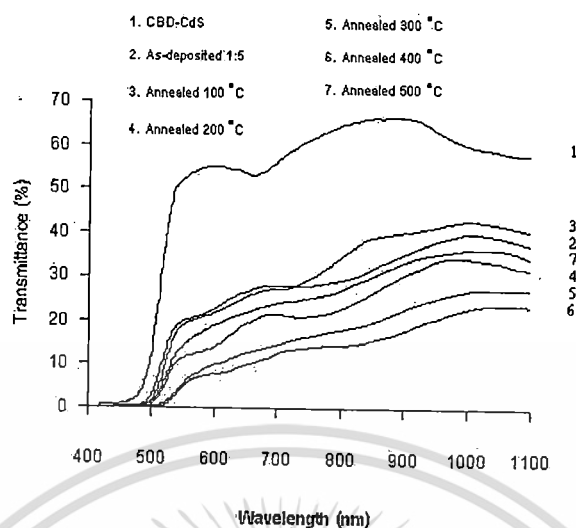
4.7.1 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกใสได้

เมื่อทำการศึกษาถึงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกใสได้ ทั้งที่ไม่ได้แอนนียลและแอนนียลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที โดยใช้เครื่องยูวี – วิสลิเบิ้ล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV / visible spectrometer JUSCO 7600) ซึ่งเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นแสงในช่วง 400-1100 nm พบว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนียลจะสามารถให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 490 nm ทะลุผ่านได้ดีทุกๆ อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S และสำหรับฟิล์มบาง CdS ที่มีการแอนนียล พบว่า แสงจะสามารถทะลุผ่านฟิล์มบางได้ดีในช่วงที่แสงมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm เป็นต้นไปซึ่งจะเป็นเช่นนี้กับฟิล์มบางทุกๆ อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เช่นกัน นอกจากนี้แล้วสำหรับฟิล์มบาง CdS ที่แอนนียลยังพบอีกว่าขอบการดูดกลืนมีแนวโน้มที่จะเลื่อนไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแอนนียล แต่สำหรับฟิล์มบางที่แอนนียลที่ 500 °C จะเป็นไปในทิศทางตรงข้าม คือขอบการดูดกลืนจะเลื่อนกลับไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า และฟิล์มบางทั้งหมดทั้งที่ไม่ได้แอนนียลและแอนนียล

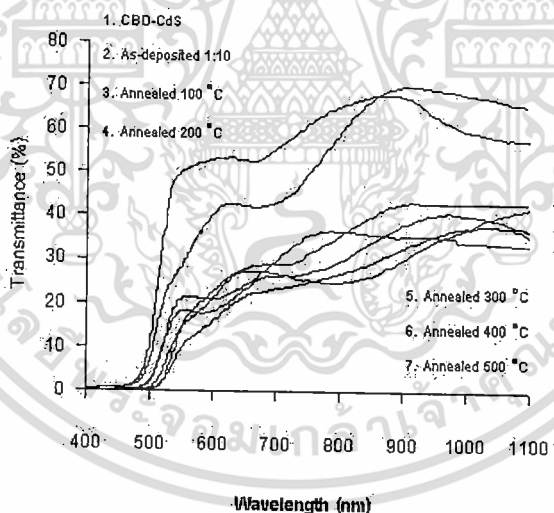
แล้วทุกช่วงอุณหภูมิ 100-500 °C และทุกๆ อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S จะมี
ความสามารถในการส่งผ่านของแสงได้มากกว่า 40% ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.13 - 4.17



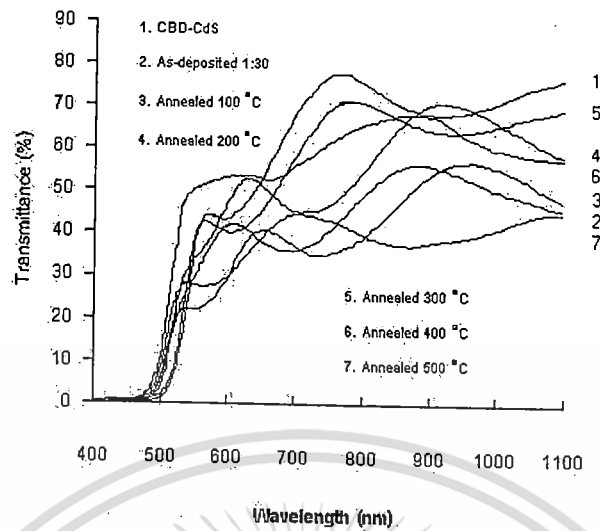
รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที



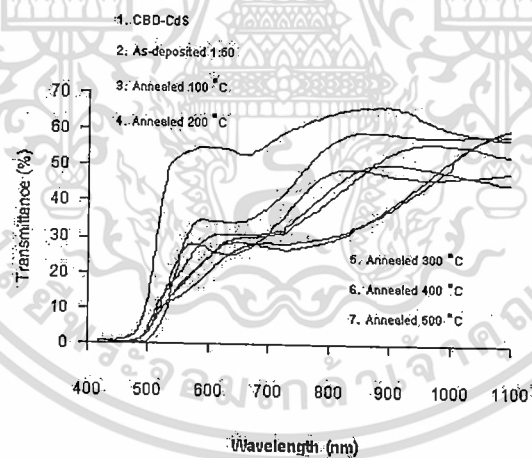
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:5 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและแอนนีกในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที



รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:10 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีกและแอนนีกในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

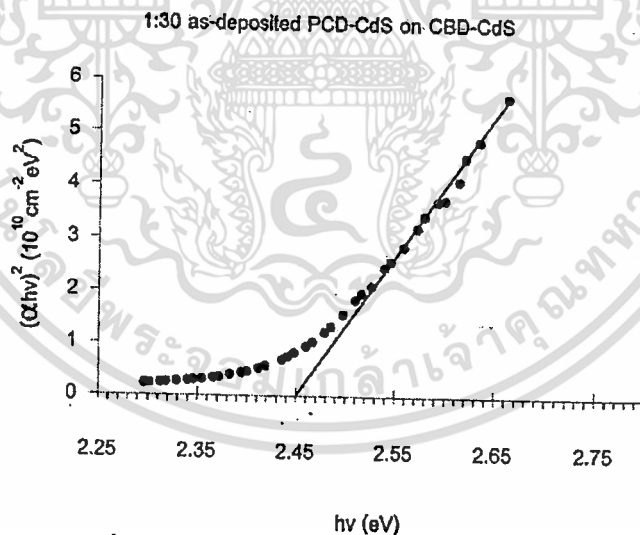


รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

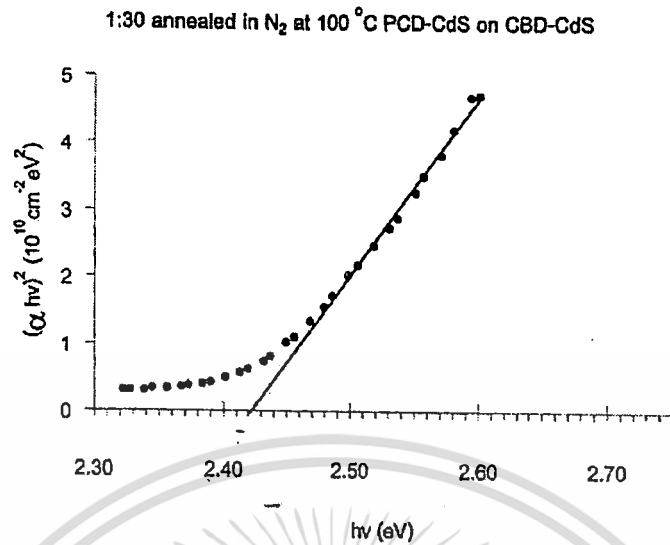


รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

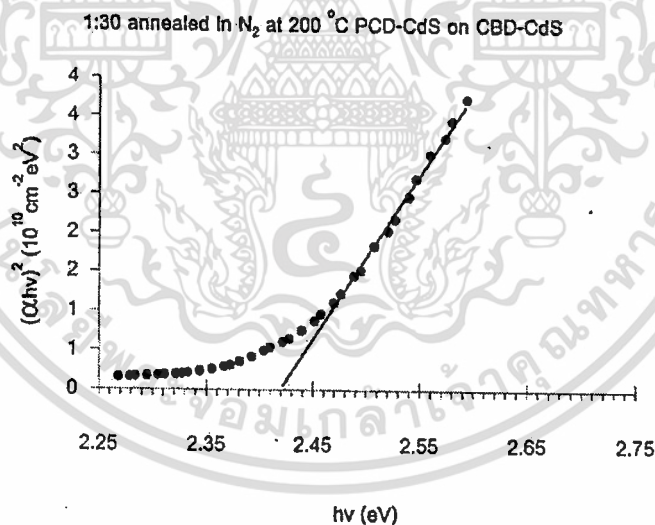
ในขั้นตอนต่อมาเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.13 - 4.17 มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มบางตามสมการ (3.15) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ดังรูปที่ 4.18 - 4.23 พบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ จะได้กราฟทั้งหมดมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงมากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำโดยมีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) สามารถหาได้จากการประมาณโดยลากส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเชิงเส้นไปตัดแกนของพลังงานโฟตอน (เมื่อ $\alpha=0$ ตามสมการ 2.12) จุดตัดที่ได้คือค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่ไม่ได้แอนนัลจะมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าฟิล์มที่แอนนัล รูปที่ 4.24 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับ CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นว่าค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานกลับมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งเกิดขึ้นกับฟิล์มบาง CdS ทุกอัตราส่วน ยกเว้นฟิล์มบางที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 เท่านั้นที่ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.6



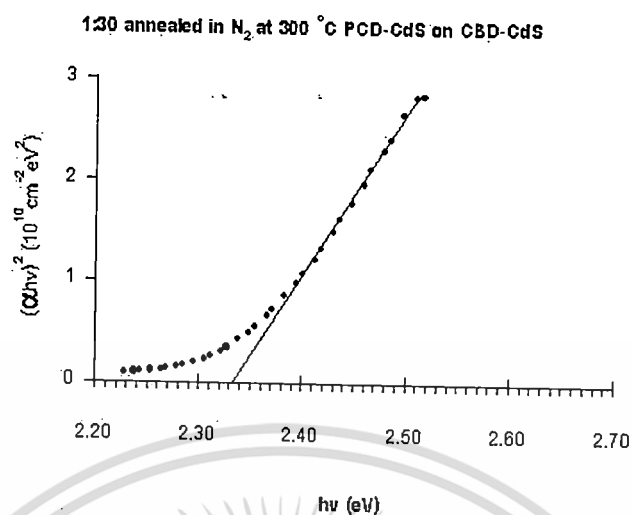
รูปที่ 4.18 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่ไม่ได้แอนนัล



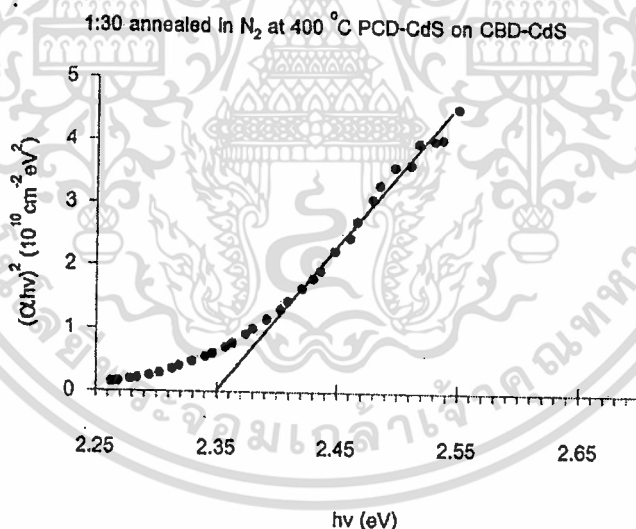
รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



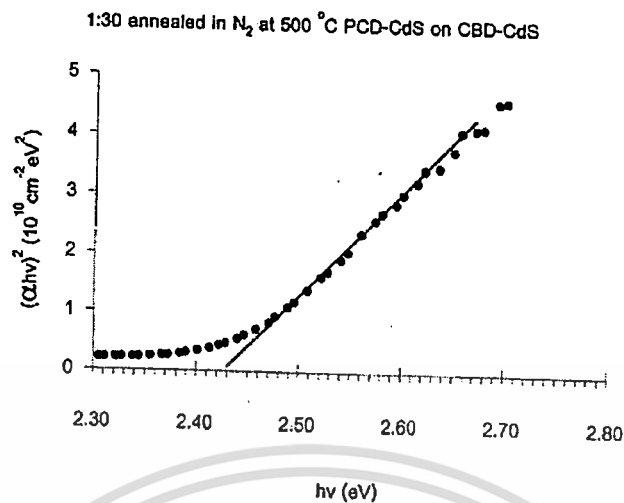
รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ $200^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



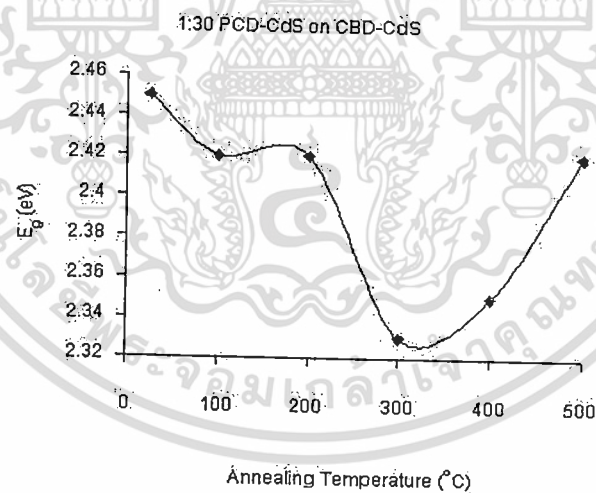
รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.23 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ยกกำลังสอง $(\alpha hv)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์ม บาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่ อุณหภูมิ $500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



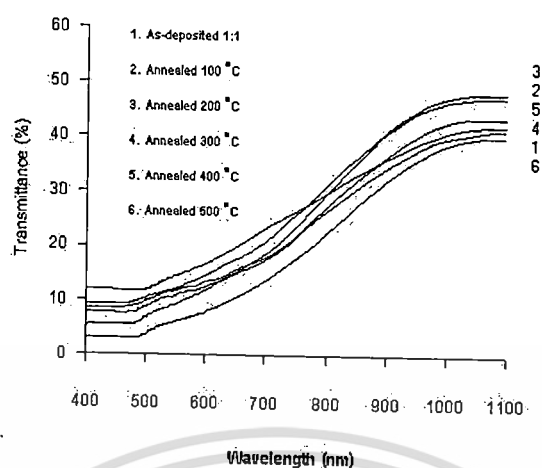
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัล และแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ $100-500^\circ C$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็น เวลานาน 20 นาที

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัล ในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

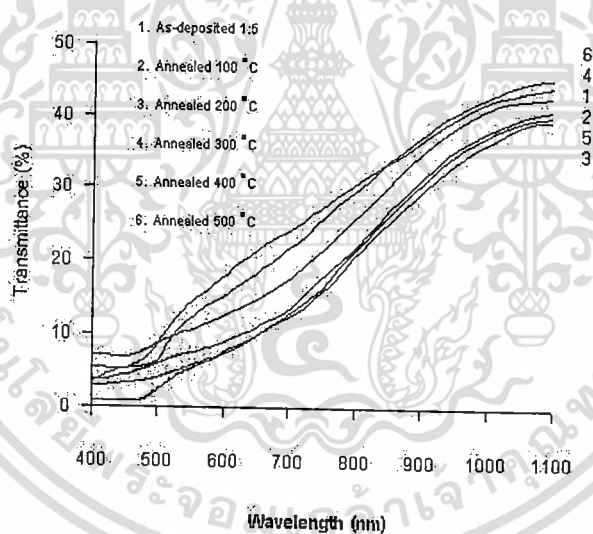
อุณหภูมิแอนนัล (°C)	E_g (eV)				
	1 : 1	1 : 5	1 : 10	1 : 30	1 : 50
as-deposited	2.44	2.43	2.43	2.45	2.43
100	2.38	2.41	2.40	2.42	2.41
200	2.36	2.40	2.39	2.42	2.39
300	2.35	2.32	2.32	2.33	2.38
400	2.29	2.31	2.34	2.35	2.41
500	2.30	2.40	2.39	2.42	2.41

4.7.2 การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

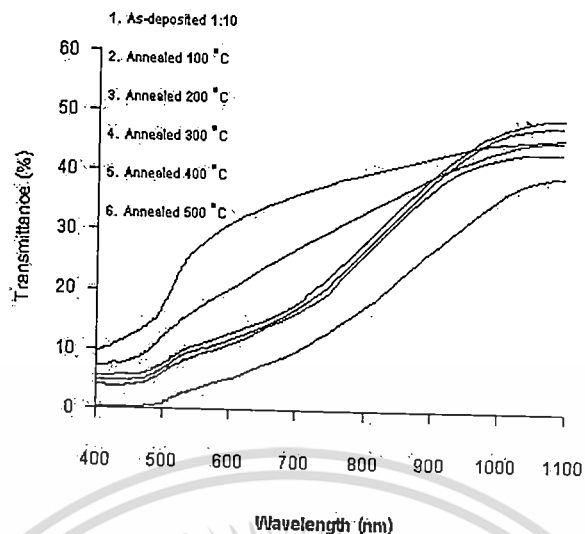
ในการทำนองเดียวกันกับการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ พบว่า ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนัลจะยอมให้แสงความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ผ่านไปได้ แต่เมื่ออัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เพิ่มขึ้น ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะคมชัดยิ่งขึ้นและเลื่อนไปในทางความยาวคลื่นที่สั้นลงเล็กน้อย นอกจากนี้สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ผ่านการแอนนัลแล้วยังพบอีกว่า ขอบการดูดกลืนมีแนวโน้มที่จะเลื่อนไปในทิศทางที่ความยาวคลื่นค่ามากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแอนนัลในช่วง 100-300°C แต่สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่แอนนัลที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C จะเป็นไปในทิศทางตรงข้าม คือ ขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า เช่นเดียวกับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ และฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ทั้งหมดทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลแล้วทุกช่วงอุณหภูมิ 100-500°C และทุกๆอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S จะมีความสามารถในการส่งผ่านแสงได้มากกว่า 40% ในลักษณะเดียวกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.25- 4.29



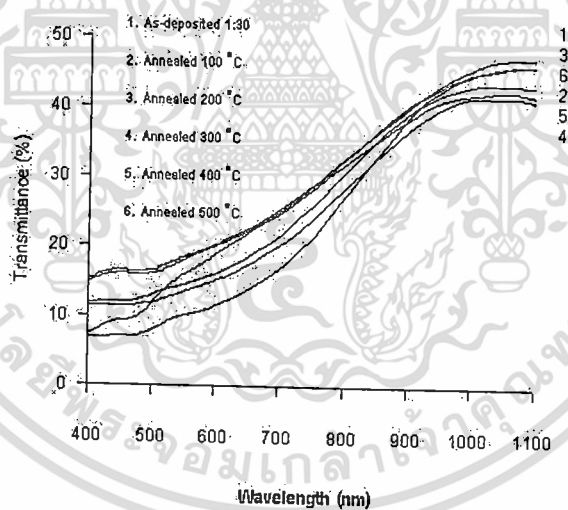
รูปที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:1 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที



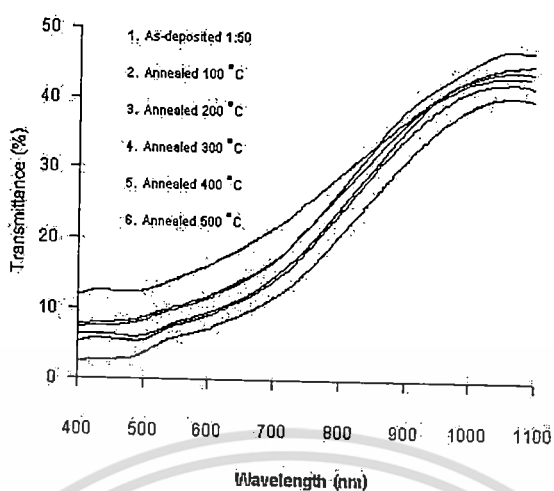
รูปที่ 4.26 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:5 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที



รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:10 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

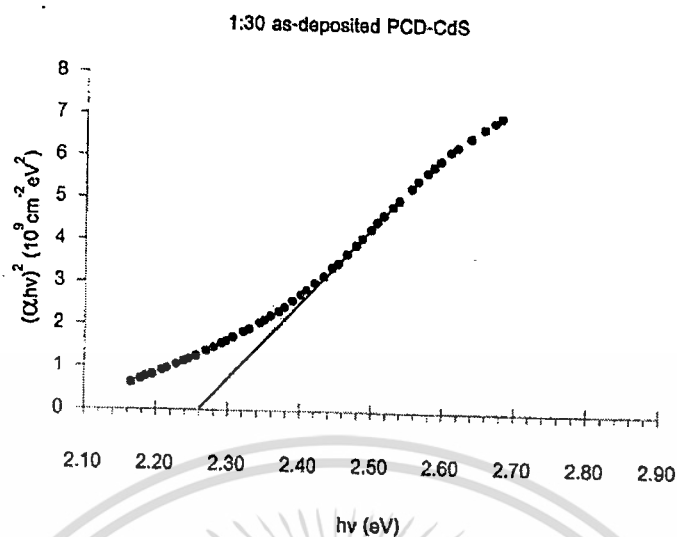


รูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนีสและแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

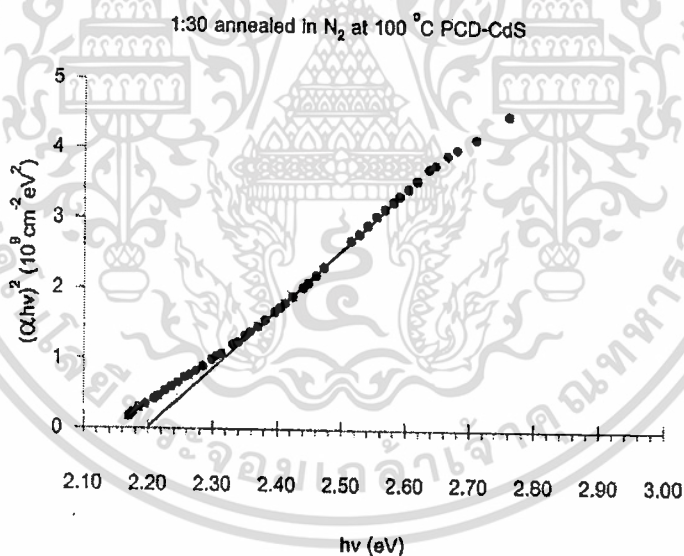


รูปที่ 4.29 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-1100 nm ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:50 ทั้งที่ไม่ได้แอนนียลและแอนนียลในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

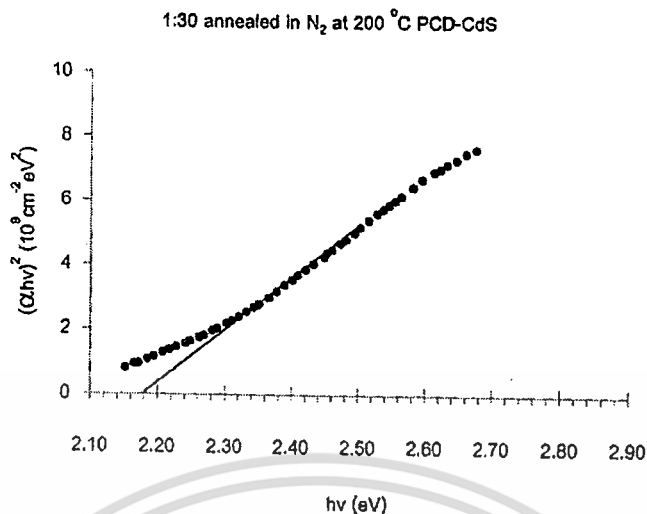
ในลักษณะเดียวกันกับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ เมื่อนำข้อมูลข้างต้นจากรูปมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง (α^2) กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ดังรูปที่ 4.30- 4.35 พบว่า ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นและสามารถหาค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานได้ ซึ่งจะพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ไม่ได้ผ่านการแอนนียล จะมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ผ่านการแอนนียล นอกจากนั้นเมื่ออุณหภูมิแอนนียลเพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นว่าค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนียลเป็น 500°C ค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานกลับมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งจะเป็นเช่นนี้กับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ทุกๆอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ซึ่งก็เป็นลักษณะคล้ายกับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.36



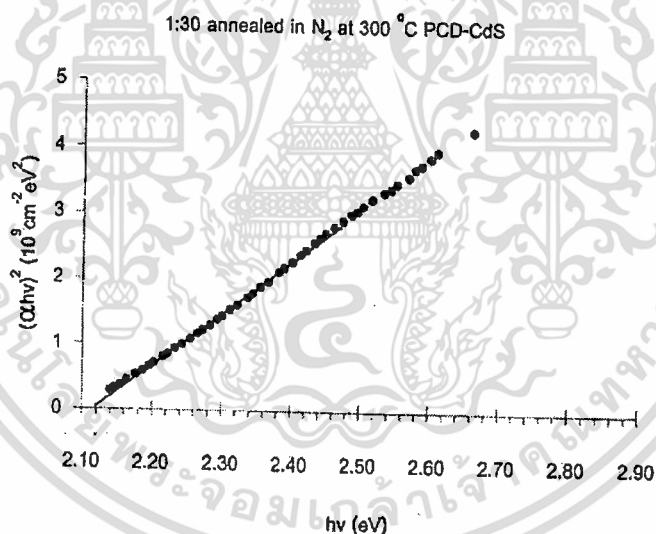
รูปที่ 4.30 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่ไม่ได้แอนนัล



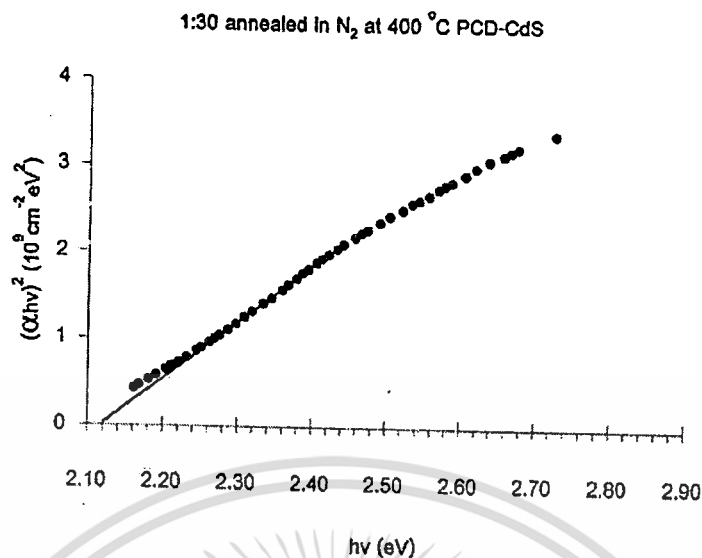
รูปที่ 4.31 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100°C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



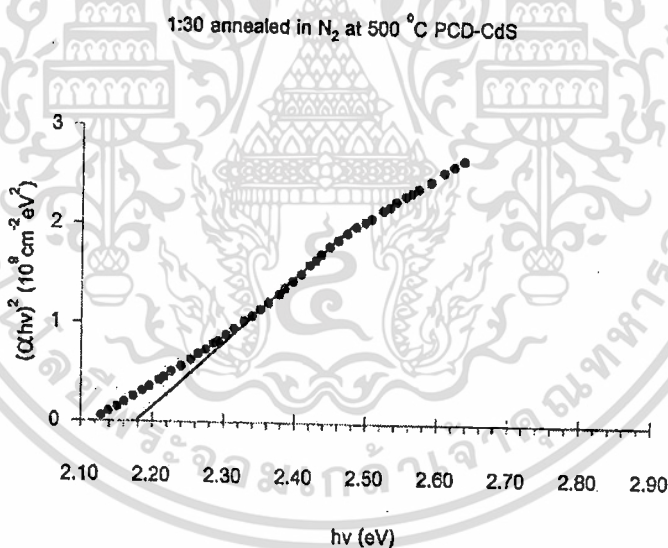
รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



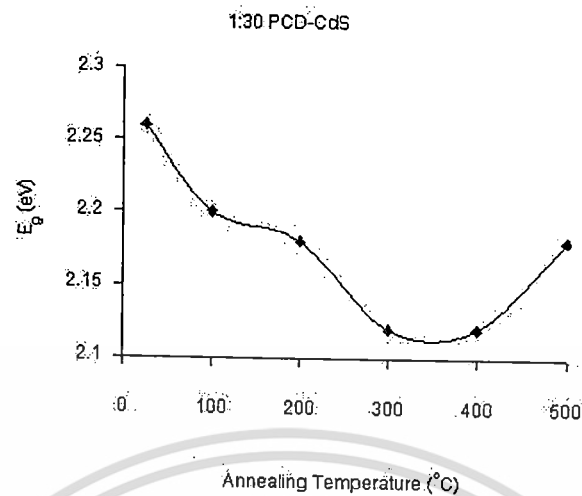
รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.34 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบน กระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่ อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.35 แสดงการหาค่าช่องว่างของแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ยกกำลังสอง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบน กระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ที่แอนนัลที่ อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.36 แสดงกราฟค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัล ในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างของแถบพลังงานของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ ทั้งที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัล ในช่วงอุณหภูมิ 100-500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลานาน 20 นาที

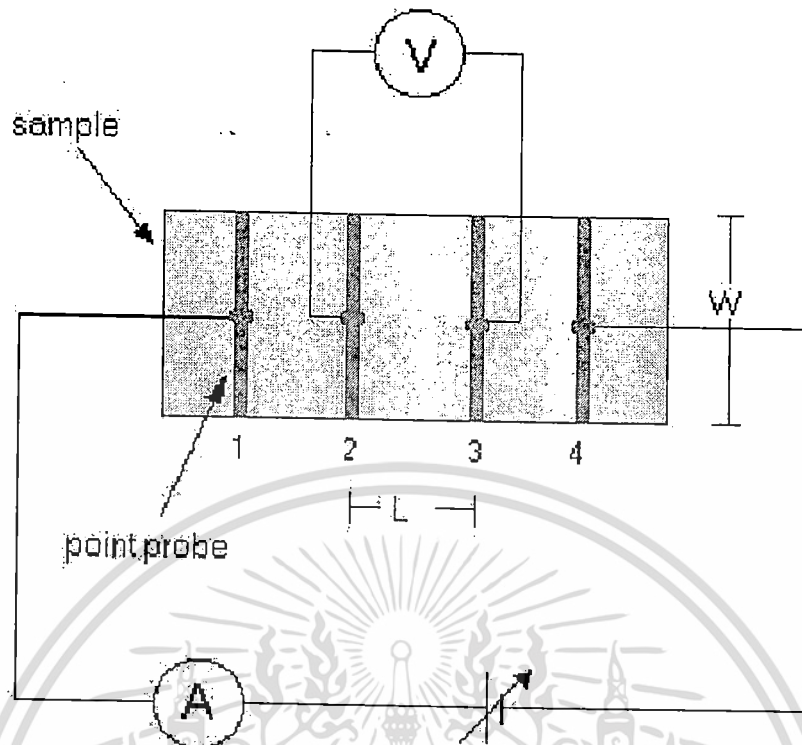
อุณหภูมิแอนนัล (°C)	E_g (eV)				
	1 : 1	1 : 5	1 : 10	1 : 30	1 : 50
as-deposited	2.24	2.30	2.28	2.26	2.25
100	2.27	2.26	2.26	2.20	2.20
200	2.20	2.30	2.27	2.18	2.16
300	2.18	2.23	2.22	2.12	2.07
400	2.22	2.20	2.32	2.12	2.16
500	2.29	2.31	2.28	2.18	2.19

สังเกตได้ว่าเมื่อนำข้อมูลของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่า E_g มีค่าอยู่ในช่วง 2.07-2.45 eV และพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ค่าของขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่อุณหภูมิแอนนัลที่มีค่าต่ำลง

4.8 วิธีการทดลองและผลการทดลองการวัดค่าความต้านทานแผ่น

4.8.1 อุปกรณ์

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 30 โวลต์
2. อิเล็กโตรมิเตอร์ 610 CR
3. โวลต์มิเตอร์
4. ลักซ์มิเตอร์
5. กาวเงินนำไฟฟ้า
6. หลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์
7. หลอดไฟไอปรอทความดันสูง ที่มีกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์



รูปที่ 4.37 แสดงหลักการการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

4.8.2 วิธีการทดลอง

1. นำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1 , 1:5 , 1:10 , 1:30 และ 1:50 ตามลำดับ ทั้งกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนัลและที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 – 500 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที มาทำรอยต่อโดยการใช้กาวเงินนำไฟฟ้ามาแต้มบนผิวหน้าของฟิล์มบางให้มีลักษณะเป็นเส้นยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยให้ระยะห่างระหว่างแถบกาวเงินเท่ากัน ซึ่งแถบกาวเงินนำไฟฟ้านี้จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้า (point probe)
2. ต่อวงจรตามรูปที่ 4.37 โดยให้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงต่อที่ขั้ว 1 และ 4 แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมที่ขั้ว 2 และ 3 และใช้โอห์มมิเตอร์วัดค่ากระแสที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้กับวงจร

3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจร แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ และค่ากระแสที่อ่านได้จากอิมพีแดนซ์มิเตอร์ โดยค่ากระแสที่ได้จะอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-9} แอมแปร์
4. เพิ่มแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจร จะทำให้ค่ากระแสที่ไหลในวงจรมีค่ามากขึ้น แล้วทำการบันทึกค่าความต่างศักย์และค่ากระแสที่อ่านได้ โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสประมาณ 10 ค่า
5. ทำการทดลองข้อ 3 – 4 ซ้ำ แต่สลับขั้วของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง คือเป็นการไบอัสกลับทาง (reverse bias)
6. ทำการทดลองข้อ 3 – 5 ซ้ำ แต่ทำการฉายแสงให้กับฟิล์มบางที่ทำการวัด โดยจะฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 95,000 ลักซ์ ให้กับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ และฉายแสงจากหลอดไฟที่บรรจุ ไอปรอทความดันต่ำ ที่มีกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ที่ความเข้มแสง 21,000 ลักซ์ ให้กับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
7. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่าความต่างศักย์ ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V}{I} \left(\frac{W}{L} \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ W = ความกว้างของฟิล์มบาง
 L = ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 2 และ 3
 $\frac{V}{I}$ = ความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าความต่างศักย์

4.8.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น ปรากฏว่าฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลและที่ไม่ได้แอนนัล เมื่อฉายแสงให้กับฟิล์มบางแล้ว จะทำให้ค่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงจากเดิมก่อนการฉายแสง ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ จะใช้แสงจากหลอดฮาโลเจน ELH เนื่องจากฟิล์มบาง

CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ จะปรากฏข้อบกพร่องของผลึกชนิดแวแคนซีของซัลเฟอร์[2,13] ซึ่งทำหน้าที่เป็นกับดักอิเล็กตรอน เมื่อฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH แสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดักอิเล็กตรอนกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และสำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จะใช้แสงจากหลอดไฟที่บรรจุไฮปรอทความดันสูง เนื่องจากฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จะปรากฏข้อบกพร่องของผลึกเป็นกับดักที่ประพติตัวเป็นศูนย์กลางการรวมตัว เมื่อฉายแสงจากหลอดไฟที่บรรจุไฮปรอทความดันสูง แสงจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แสดงว่าเมื่อมีการฉายแสงให้กับฟิล์มบาง CdS จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มบางสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งค่าความต้านทานแผ่นที่วัดได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

จากรูปที่ 4.38 - 4.42 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่ทำการแอนนีลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ และจากรูปที่ 4.43 - 4.47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ทำการแอนนีลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ต่างๆ ปรากฏว่าที่อุณหภูมิแอนนีล $100 - 300^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้นค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนขอบเขตของเกรนจึงลดลง ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระเจิงเนื่องจากการชนขอบของเกรนน้อยลง และข้อบกพร่องชนิดแวแคนซีของซัลเฟอร์ ซึ่งประพติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน ซึ่งมีอิเล็กตรอนถูกจับไว้แล้ว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกกระตุ้นให้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระเมื่อถูกฉายแสงลงบนฟิล์มบาง [2] นอกจากนั้นที่ขอบของเกรนพันธะของอะตอมจะไม่สมบูรณ์ จะสามารถจับอิเล็กตรอนอิสระไว้ได้ [16] แต่เมื่อฉายแสงอิเล็กตรอนเหล่านี้จะหลุดออกมาบริเวณขอบของเกรนกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางมีแนวโน้มลดลง แต่ที่อุณหภูมิแอนนีล $300 - 500^{\circ}\text{C}$ ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางกลับมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้น โครงสร้างของฟิล์มบางจะมีความเป็นระเบียบมากขึ้น รวมทั้งออกซิเจนที่ถูกจับเอาไว้ที่ผิวหน้าฟิล์มบางที่ขอบของเกรนแบบการดูดกลืนเชิงฟิสิกส์ (physisorption) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบการดูดกลืนเชิงเคมี (chemisorption) ออกซิเจนจะรวมตัวกับธาตุที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง กลายเป็นโมเลกุลใหม่ โดยการจับอิเล็กตรอนอิสระเข้ามาสร้างพันธะเคมี ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจึงลดลง ค่าความต้านทานแผ่นจึงเพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิแอนนีลสูงขึ้นฟิล์มบางจะมีความเป็นสโตยคิโอเมตริกมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางมากขึ้นด้วยเช่นกัน [2,11-13] ส่วนความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง

ภายใต้การฉายแสงกับไม่ฉายแสง จะมีค่าแตกต่างกันน้อยลง เนื่องจากอุณหภูมิแอนนیلที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้พันธะที่ไม่สมบูรณ์ที่ปรากฏที่ขอบของเกรนมีปริมาณลดลง ดังนั้นปริมาณอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกจับไว้ที่พันธะไม่สมบูรณ์นี้จะมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ฟิล์มบางตอบสนองต่อแสงน้อยลง

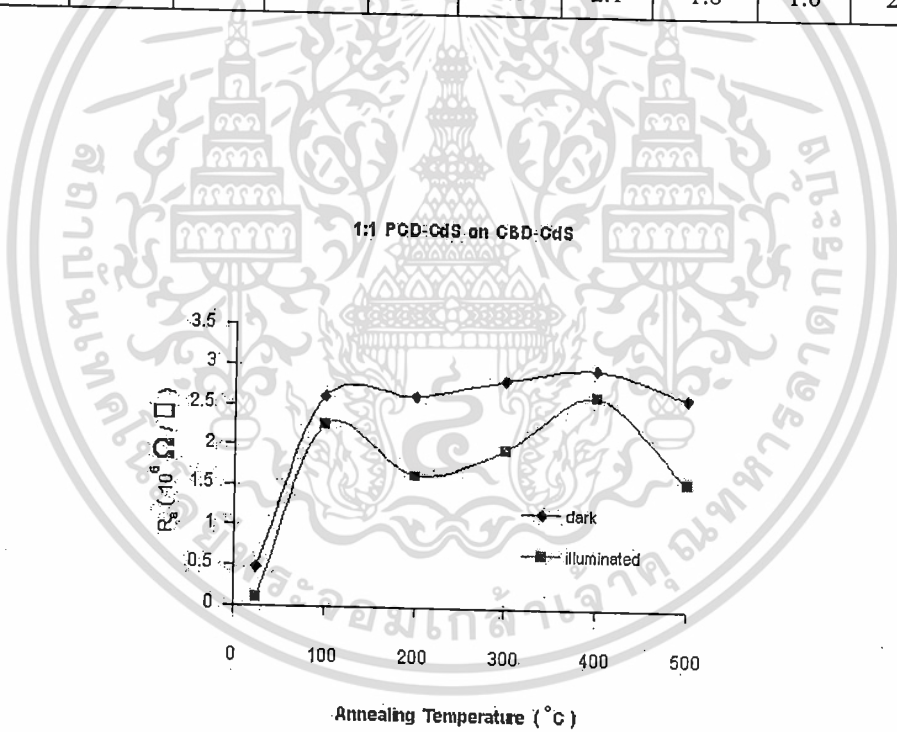
จากรูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที และรูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที ปรากฏว่าเมื่ออัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S มากขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางจะมีแนวโน้มมากขึ้น เนื่องจากข้อบกพร่องชนิดแวนแคนซีของซัลเฟอร์กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S มากขึ้น อะตอมของซัลเฟอร์จะมากขึ้น ทำให้ปริมาณของข้อบกพร่องชนิดแวนแคนซีของซัลเฟอร์ลดลง เป็นผลให้การตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางลดลง [2, 11-13]

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS

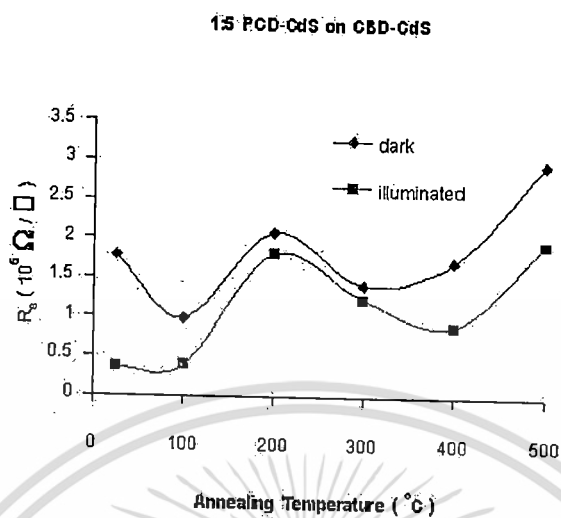
อุณหภูมิแอนนิล (°C)	R_s ($10^6 \Omega / \square$) PCD-CdS on CBD-CdS									
	1 : 1		1 : 5		1 : 10		1 : 30		1 : 50	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
as-deposited	0.4	0.1	1.7	0.3	0.6	0.2	1.8	0.2	1.8	0.2
100	2.6	2.2	0.9	0.3	2.2	0.4	2.1	1.0	1.6	0.1
200	2.6	1.6	2.0	1.8	1.5	0.7	1.8	0.8	1.1	0.2
300	2.8	1.9	1.4	1.2	2.9	2.4	1.7	0.8	1.8	1.1
400	2.9	2.6	1.7	0.8	4.0	2.5	2.3	1.9	2.5	1.8
500	2.6	1.5	2.9	1.9	4.3	2.6	3.6	3.3	2.8	1.6

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์

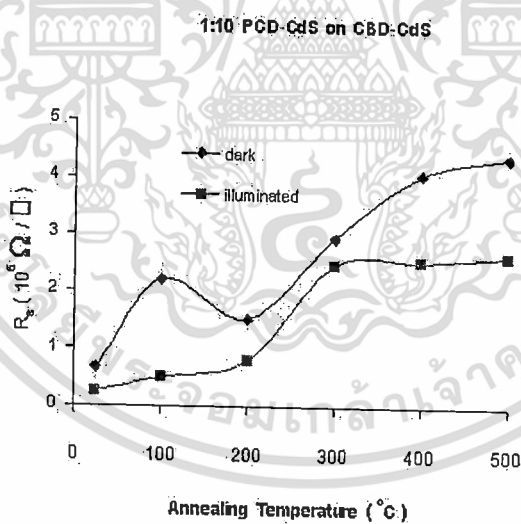
อุณหภูมิ แอนนีย์ล (°C)	R_s ($10^6 \Omega / \square$) PCD-CdS									
	1 : 1		1 : 5		1 : 10		1 : 30		1 : 50	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
as-deposited	2.4	1.1	1.5	1.0	0.3	0.3	0.4	0.2	0.6	0.7
100	0.4	0.2	2.2	2.6	1.6	0.9	0.1	0.1	2.4	2.4
200	2.0	0.8	2.4	2.7	1.7	1.6	0.2	0.3	2.6	2.8
300	3.1	2.5	3.8	3.8	2.9	3.0	0.3	0.4	2.1	2.2
400	1.9	2.4	0.8	0.9	3.2	3.3	2.1	2.0	2.4	2.5
500	1.4	0.9	1.5	1.4	2.0	2.1	1.8	1.6	2.4	3.0



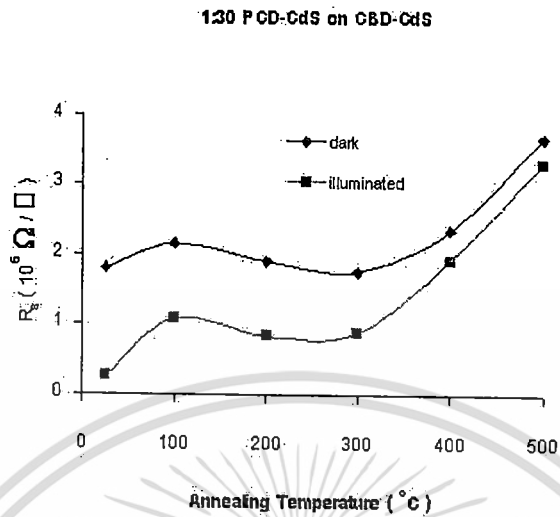
รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 1 ที่ทำการแอนนีย์ลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



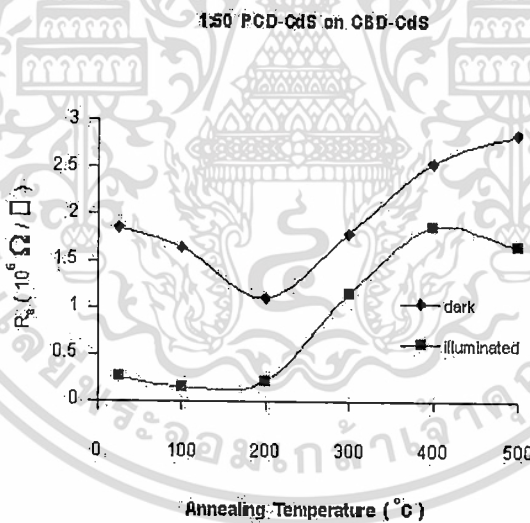
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 5 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



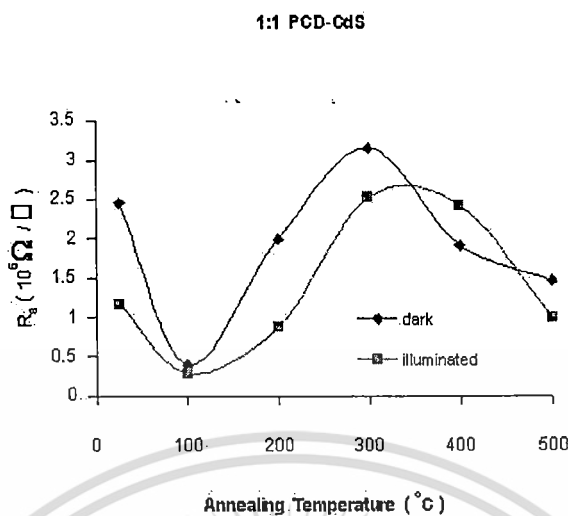
รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 10 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



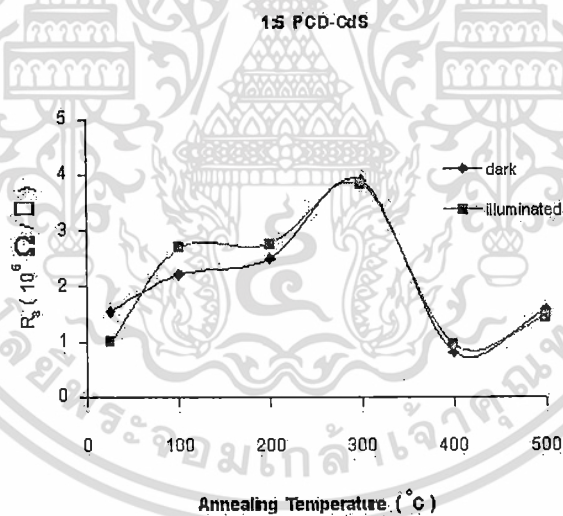
รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 30 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



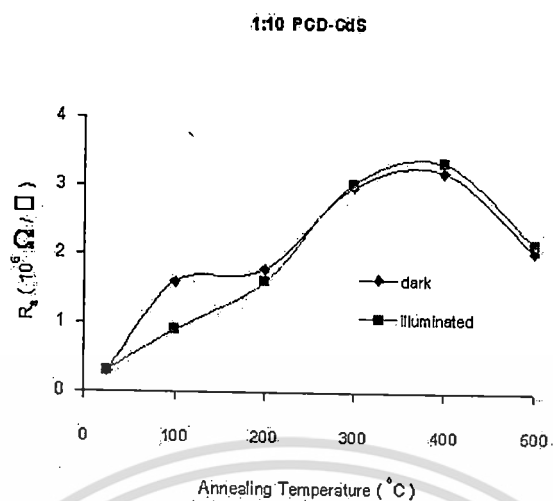
รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 50 ที่ทำการแอนนียลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



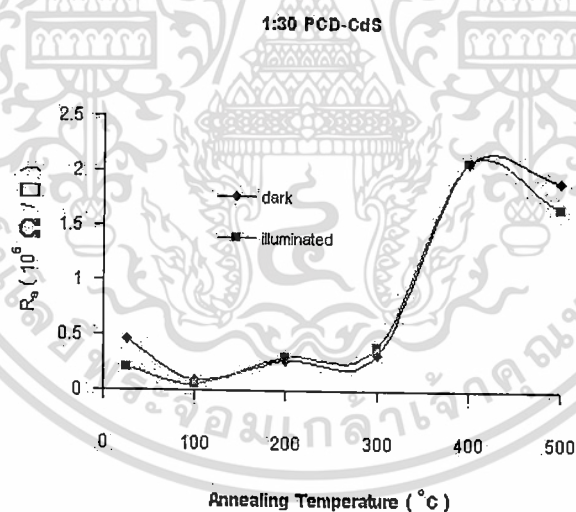
รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 1 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



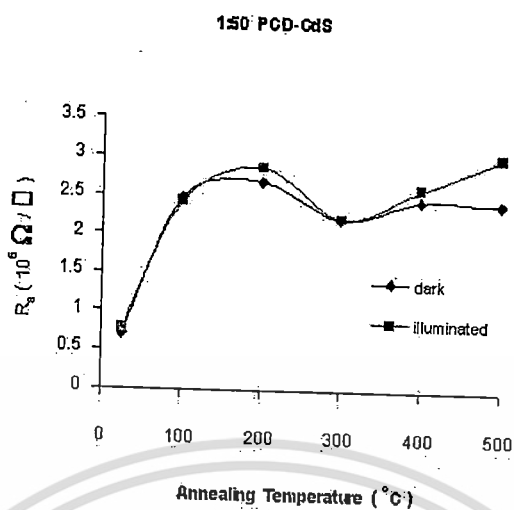
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 5 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



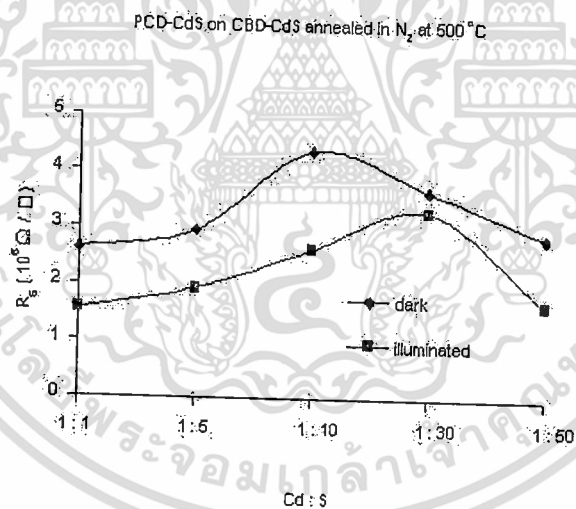
รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 10 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



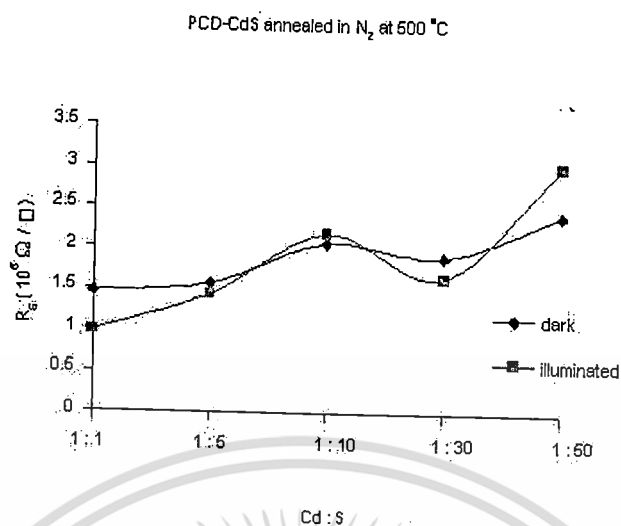
รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 30 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ที่มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1 : 50 ที่ทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนฟิล์มบาง CBD-CdS แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง PCD-CdS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ แต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S ที่ทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยใช้วิธี PCD ภายในตู้ดูดไอระเหยสารเคมี ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้คือ CdSO_4 และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ โดยมีความเข้มข้น 0.002 M และ 0.1 M ตามลำดับ ถูกนำมาเทรวมกันในภาชนะพลาสติกทึบสภาพความเป็นกรดที่ภายในมีแท่งกวนแม่เหล็ก และมีแผ่นพลาสติกทึบสภาพความเป็นกรดที่ใช้สำหรับวางแผ่นรองรับ และแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ประมาณ 40 ชิ้น โดยวางแผ่นรองรับเรียงกันบนแผ่นพลาสติกทึบสภาพความเป็นกรดที่ใช้สำหรับวางแผ่นรองรับห่างจากผิวของสารละลายประมาณ 3-5 mm ให้ความร้อนไว้ก่อน ทำการกวนสารละลายโดยการใช้นาฬิกาแม่เหล็ก ซึ่งจะตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ทำการหยดกรดประมาณ 18 หยด แล้วทำการหยุดให้ความร้อน ปิดตู้ทำการฉายแสงทันทีเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมงแล้วปิดแสง นำภาชนะพลาสติกออกมา จะพบว่าสารละลายจะมีสีเหลืองอ่อนและมีตะกอนกระจายอยู่ในภาชนะ เมื่อทำการวัดค่า pH จะมีค่าประมาณ 3 และทำการวัดอุณหภูมิของสารละลายจะได้ประมาณ 35°C แล้วนำแผ่นรองรับมาวางข้างนอกภาชนะพลาสติกจะพบว่าฟิล์มบาง CdS เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยฟิล์มบาง CdS ทั้งหมด 40 ชิ้นในภาชนะจะมีอัตราการเคลือบที่ต่างกัน จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมจนครบ 6 ครั้ง ซึ่งจะพบว่าฟิล์มบาง CdS จะก่อตัวหนาขึ้นตามจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับจะมีความหนาประมาณ 300 nm โดยฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จะมีลักษณะสีเหลืองและมีความเรียบสม่ำเสมอพอสมควร แต่จะมีตะกอน CdS ปะปนอยู่ด้วย

เมื่อทำการแปรเปลี่ยนอัตราของปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น CdSO_4 และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ให้มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ซึ่งจะพบว่าฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มีความหนาและความเรียบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่อัตราส่วนที่มีความแตกต่างระหว่าง Cd : S มาก จะได้ฟิล์มบางที่มีความหนามากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีอะตอมของ S มากกว่าจึงมีโอกาสรวมตัวกับ Cd เป็นสารประกอบ CdS แล้วเคลือบลงบนแผ่นรองรับได้มากกว่า

เมื่อนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เป็นระยะเวลาประมาณ 20 นาที พบว่าฟิล์มจะยึดติดบนแผ่นรองรับได้มากขึ้นกว่าเดิม มีการจัดเรียงตัวของเกรนไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น และสีของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไปจากสีเหลืองส้มเข้มขึ้นไปตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น

เนื่องจากเราต้องการเคลือบฟิล์มบางให้ติดแน่นบนแผ่นรองรับ ดังนั้นเราจึงเลือกแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ ซึ่งฟิล์มบาง CdS นี้เตรียมโดยวิธี CBD บนกระจกสไลด์ เพื่อเป็น

จุดกำเนิดให้กับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD ทำการเคลือบทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 1 ชั่วโมง ผลที่ได้คือฟิล์มบาง CdS สามารถยึดเกาะอยู่บนแผ่นรองรับได้ดีขึ้นและมีอัตราการเคลือบมากกว่าเดิม

เมื่อเรานำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ทำการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น ให้มีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd : S เป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:30 และ 1:50 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จะเหมือนกับกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่จะต่างกันที่อัตราการเคลือบ โดยในกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD โดยมีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์จะมีอัตราการเคลือบที่ดีกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะมีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จากวิธี CBD เป็นจุดกำเนิดผลึกที่ติดอยู่แล้ว และเมื่อนำไปแอนนัลก็จะได้ผลเหมือนในกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงจุลภาคของทั้งกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้โดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สังเกตพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้กรณีเมื่อไม่แอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 °C ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก ซึ่งจัดเรียงตัวในลักษณะที่ทิศของระนาบ (111) ตั้งฉากกับแผ่นรองรับและเห็นพิกมีความเข้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้การจัดเรียงตัวของระนาบไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้นถึงประมาณ 400 °C โครงสร้างผลึกจะมีการเปลี่ยนเฟสเป็นแบบเฮกซะโกนอล โดยสังเกตได้จากพิกที่ปรากฏจากระนาบ (100), (002), (101), (110) และ (112) และที่อุณหภูมิแอนนัล 500 °C จะเห็นพิกมีความเข้มมากขึ้น นอกเหนือจากนั้นจากการทดลองเราพบว่าที่อัตราส่วนอื่นๆทั้งหมดก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกัน และยังเป็นการแสดงให้เห็นอีกว่าลักษณะของการเปลี่ยนเฟสไม่ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม ไม่ว่าจะเตรียมโดยวิธี PCD หรือวิธี CBD ก็ให้ผลไม่ต่างกัน

ยิ่งไปกว่านั้นจากการทดลองเราได้ทำการพิจารณาฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ในแต่ละอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S ทั้งกรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลและกรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C ซึ่งเราพบว่า กรณีเมื่อไม่มีการแอนนัลที่อัตราส่วนของปริมาณของความเข้มข้นของ Cd:S 1:50 พิกที่ปรากฏจะมีความเข้มมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ กรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 และ 200 °C ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:30 พิกที่ปรากฏจะมีความเข้มมากกว่าอัตราส่วน

ของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S อื่นๆ กรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:10 พิกที่ปรากฏจะมีความเข้มมากกว่าอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S อื่นๆ กรณีแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C ที่อัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เป็น 1:5 พิกที่ปรากฏจะมีความเข้มมากกว่าอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S อื่นๆ

จากการทดลอง พิกที่ปรากฏมีความเข้มมาก ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มบางมีความหนาและ/หรือมีความเป็นสโตยคิโอมेटรีมาก แต่ความเข้มของพิกอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัลเนื่องจากอุณหภูมิอาจช่วยปรับให้ฟิล์มบางมีความใกล้เคียงความเป็นสโตยคิโอมेटรีมากขึ้น[11-13] โดยอาจมีตะกอนบางส่วนระเหยออกไปจากผิวหน้าของฟิล์มบาง ซึ่งหมายความว่าความหนาของฟิล์มบางอาจเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัล ในทำนองเดียวกันความเข้มของพิกก็เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S และอุณหภูมิแอนนัล ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาการส่งผ่านของแสง พบว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิแอนนัล ซึ่งขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปดังกล่าว อาจเกิดมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. โครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนไปย่อมทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนไป
2. มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ(disorder)จะทำให้เกิดส่วนหางของแถบพลังงาน(band tail)
3. ผลของขนาดควอนตัม(quantum size effect)หรือขนาดของเกรน

ทั้งในกรณีของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมด้วยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD บนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบบนกระจกสไลด์ พบว่า ในช่วงอุณหภูมิแอนนัลที่ต่ำกว่า 400 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแอนนัลจะมีผลทำให้ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดเล็กลง นั่นคือ ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีฟิล์มที่ยังไม่ได้ผ่านการแอนนัลจะมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมากที่สุดในทุกอัตราส่วนของ Cd:S ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ผลของขนาดของเกรนจะมีลักษณะเด่นกว่าเหตุผลในข้อ 1 และ 2 ส่วนช่วงที่อุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 400 °C พบว่า ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัล ที่เป็นเช่นนี้อาจกล่าวได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเฮกซะโกนอล ซึ่งอะตอมต่างๆจะอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมกว่า ซึ่งจะทำให้ลดปัญหาที่เกิดจากส่วนหางของแถบพลังงานได้ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มสูงขึ้น ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีเฟสเฮกซะโกนอลที่เด่นชัดขึ้นเรื่อยๆ

เมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้นปรากฏว่าค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี PCD จะมีค่าลดลงเมื่อมีการฉายแสง

ให้กับฟิล์มบาง และเมื่อนำฟิล์มบาง CdS ไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 20 นาที พบว่าค่าความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิแอนนัลที่ 300 °C เนื่องจากเกรนของฟิล์มบางมีขนาดใหญ่ขึ้น และข้อบกพร่องชนิดแวนเดินวาล์ของซัลเฟอร์ที่มีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น แต่หลังจากนั้นค่าความต้านทานแผ่นกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มบางมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และออกซิเจนที่ถูกจับเอาไว้ที่ผิวหน้าฟิล์มบางที่ขอบของเกรนแบบการดูดกลืนเชิงฟิสิกส์ (physisorption) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบการดูดกลืนเชิงเคมี (chemisorption) ออกซิเจนจะรวมตัวกับธาตุที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง กลายเป็นโมเลกุลใหม่ โดยการจับอิเล็กตรอนอิสระเข้ามาสร้างพันธะเคมี รวมทั้งฟิล์มบางจะมีความเป็นสโตยคิโอมेटรีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น และค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มบางมีอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของ Cd:S เพิ่มขึ้นด้วย

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ควรจะมีการปรับปรุงเทคนิคบางประการเพื่อให้ได้ผลการทดลองออกมามีดีขึ้นและการคิดค้นเทคนิคบางอย่างเพื่อปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มให้ดีขึ้นไปกว่าเดิมโดยจำแนกได้ดังนี้

- ในวิธี PCD นั้นจะเห็นได้ว่ามีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และมีบางปฏิกิริยาทำให้ได้ตะกอนไปเคลือบอยู่บนผิวของฐานรองทำให้ได้ฟิล์มบาง CdS ที่มีตะกอนของ CdS ปนอยู่ด้วย เราจึงควรคิดค้นปฏิกิริยาเคมีขึ้นมาใหม่เพื่อให้ได้ฟิล์มบาง CdS อย่างเดียวเท่านั้นที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับ
- วิธี PCD แสงจะมีบทบาทอย่างมากกับปฏิกิริยาเคมี คือไอออนของสารประกอบ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จะดูดกลืนแสงเพื่อสลายพันธะแล้วปลดปล่อย S ออกมาและไอออนของสารประกอบ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จะดูดกลืนแสงแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระออกมา ดังนั้นเราควรใช้หลอดไฟที่มีกำลังไฟฟ้ามากกว่านี้เพื่อเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะส่งผลกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น
- วิธี PCD เราใช้แผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเราควรจะลองเปลี่ยนเป็นวัสดุชนิดอื่นดูบ้าง เช่น พลาสติก เหตุผลเพราะว่าในการทดลองที่ผ่านมาเราใช้ภาชนะที่ใส่สารละลายและที่วางแผ่นรองรับเป็นพลาสติก ปรากฏว่ามีฟิล์มบาง CdS ไปเคลือบอยู่บนพลาสติกที่เป็นภาชนะและเป็นที่วางแผ่นรองรับ
- จากการทดลองเราได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD โดยมีฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เคลือบอยู่ก่อนซึ่งถือเป็นการเคลือบซ้ำโดยอาศัยวิธีที่แตกต่างกัน แต่ได้ฟิล์มบางชนิดเดียวกัน คือ CdS จากการทดลองนี้เราน่าจะลองทำการเคลือบฟิล์มบางของสารประกอบต่างชนิดกันที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกัน เช่น ฟิล์มบาง In_2O_3 เป็นต้น เพื่อ

ทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดผลึก นั่นคือเป็นการสร้างชั้นของฟิล์มบางสารประกอบขึ้นมานบนแผ่นรองรับ โดยอาจจะใช้วิธีการเตรียมแบบเดียวกันหรือต่างกันได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไขแล้วนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

- ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี PCD ในแต่ละครั้งเราจะใช้ระยะเวลาในการเคลือบครั้งละประมาณ 1 ชั่วโมง ซึ่งเราควรที่จะเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบออกไปให้มากกว่านี้ ซึ่งฟิล์มอาจจะเคลือบติดได้หนาขึ้นและยึดติดบนแผ่นรองรับได้แน่นขึ้น
- อาจลองสร้างรูปแบบของฟิล์มบางให้เป็นรูปร่างตามต้องการ โดยการทำหน้ากาก เมื่อฉายแสงให้ตกลงบนแผ่นรองรับตามรูปร่างของหน้ากาก
- เราอาจจะปรับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ได้ โดยการเจือ Zn เข้าไปในโครงผลึก CdS เพื่อให้ได้สารประกอบ CdZnS ซึ่งยังไม่มีผู้ใดทำมาก่อน รวมทั้งคุณสมบัติพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Zn ที่เจือเข้าไป
- เพื่อให้ฟิล์มบางติดแน่นมากขึ้น อาจใช้วิธีผสมระหว่างวิธี PCD และ วิธี CBD กล่าวคือเพิ่มอุณหภูมิขณะมีการฉายแสง

เอกสารอ้างอิง

1. Goto, F., Ichimura, M. and Arai, E., "A New Technique of Compound Semiconductor Deposition from an Aqueous Solution by Photochemical Reaction", Jpn. J. Appl. Phys. 36,(1997) : L1146-L1149.
2. 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.
3. Ichimura M., Goto, F. and Arai, E., "Photochemical Deposition of CdS from Aqueous Solutions", J. Electrochem. Soc. 146(3),(1999) : 1028-1034.
4. 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.
5. Ichimura, M., Takeuchi, K., Nakamura, A., Arai, E., "Photochemical Deposition of Se and CdSe Films from Aqueous Solutions", Thin Solid Films 384,(2001) : 157-159.
6. Kittel, C., in Introduction to Solid State Physics, 4th ed., pp.4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612, John Wiley & Sons Inc., New York, 1971.
7. Sze, S.M., in Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., pp.8-11, John Wiley & Sons Inc., New York, 1971.
8. Cullity, B.D., Elements of X-ray Diffraction, pp.9-14, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1956.
9. Abelas, F., in Optical Properties of Solids, pp.23-40, North-Holland, London, 1972.
10. Runyun, W.R., Semiconductor Measurement and Instrumentation, pp.67-91, Mc Graw-Hill, Bombay, New York, 1975.
11. จามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์", รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
12. จามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ "การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.

13. จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ
“การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
14. Jadhav U.S., Kale S.S., Lokhande C.D., “Effect of Cd:S Ratio on the Photoconducting Properties
of Chemically Deposited CdS Films”, Materials Chemistry and Physics 69,(2001) : 125-132.
15. 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.
16. Tomas, S.A., Vigil, O., Alvarado-Gill, J.J., Lozada-Morales, R. and Zelaya-Angle, O., “Influence
of Thermal Annealing in Different Atmospheres on the Band-Gap Shift and Resistivity of CdS
Thin Films”, J. Appl. Phys. 78,(1995) : 2204-2207.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อผู้ขอรับทุน (ภาษาไทย) นางงามนิตย์ แก้วแดง
(ภาษาอังกฤษ) Mrs. Ngamnit Gaewdang
2. ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2737-3000 ต่อ 6213, 6252
3. ประวัติการศึกษา
วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
วท.ม. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
4. ประสบการณ์ในการวิจัย
 - 4.1 การปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ และสารประกอบออกไซด์ ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโตกบาร์เกอร์ และวิธี CVD
 - 4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศวิธีอบสารละลายเคมี และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส
 - 4.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐาน เช่น คุณสมบัติเชิงไฟฟ้า คุณสมบัติเชิงแสง เป็นต้น
5. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่ในวารสารและสิ่งตีพิมพ์ต่าง ๆ
 - 5.1 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, C. Poo-Rakkiat and A. Nakaruk "Optoelectronic Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Deposition Technique" The International Conference on Smart Materials SmartMat'04, 1-3 December 2004, Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, p.62.
 - 5.2 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and A. Nakaruk "Studies on the Electrical and Optical Properties of $\text{SnO}_2:\text{F}$ Thin Films Prepared by Intermittent Spray Pyrolysis Method" 30th Congress on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition and Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.152
 - 5.3 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsang, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham "Some Properties of Cadmium Telluride Thin Films Grown by Thermal Evaporation" 30th Congress on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition and Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.158.

- 5.4 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham "Growth and Some Properties of CdTe Thin Films by Thermal Evaporation" The Third Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT III), 10-11 August 2004, Bangkok, Thailand, pp.264-266.
- 5.5 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, N. Promros, A. Nakaruk, W. Lipar and T. Chanyatham "Photochemical Deposition CdS Thin Films for Photovoltaic Applications" The First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004, Bangkok, Thailand, pp.75-79.
- 5.6 Ng. Gaewdang , T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and A. Nakaruk "Chareacterization of CdS Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method" The First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004, Bangkok, Thailand, pp.80-83.
- 5.7 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Thickness Dependence of Structural, Optical and Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.581-582.
- 5.8 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.
- 5.9 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "CdS Thin Films Deposited by a Modified Chemical Bath Deposition Method" KMITL Science Journal, Vol.3, No.3, 2003, pp.21-29.
- 5.10 Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Photoluminescence of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" 29th Congress on Science and Technology of Thailand, 20-22 October 2003, Khonkaen University , p.195.
- 5.11 T. Gaewdang and Ng. Gaewdang "Chemical Bath Deposition and Characterization of $Cd_{1-x}Zn_xS$ Thin Films" Third Internatinal Conference on Inorganic Materials, 7-10 September 2002, Steigenberger Hotel, Konstanz, Germany, p.39.
- 5.12 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Properties of Cadmium Sulfide Thin Films Prepared by Photochemical Deposition Technique at Room Temperature" Third Internatinal Conference on Inorganic Materials, 7-10 September 2002, Steigenberger Hotel, Konstanz, Germany, p.40.