



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

### ปริญญา

ฟิสิกส์	ฟิสิกส์
สาขา	ภาควิชา

เรื่อง การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์  
โดยวิธีอานเคลือบสารเคมี

Preparation of Cadmium Sulfide Film on Cadmium Telluride Substrate  
by Chemical Bath Deposition Method

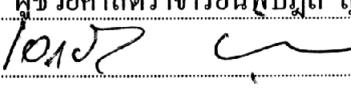
นามผู้วิจัย นายนิคม อุ่นใจ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

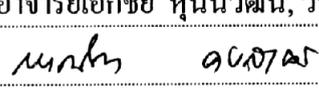
ประธานกรรมการ

(  )  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพปฎล สุทธิศิริ, วท.ม.

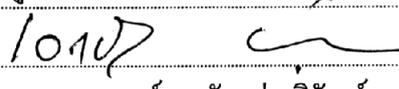
กรรมการ

(  )  
อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์, วท.ม.

กรรมการ

(  )  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรรณิภา คงสาคร, วท.ม.

หัวหน้าภาควิชา

(  )  
อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์, วท.ม.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(  )  
รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 1 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์  
โดยวิธีอาบเคลือบสารเคมี

Preparation of Cadmium Sulfide Film on Cadmium Telluride Substrate  
by Chemical Bath Deposition Method

โดย

นายนิคม อุ่นใจ

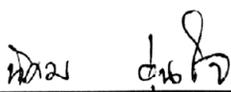
เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)  
พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2487-5

นิคม อุ่นใจ 2549: การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์  
โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์  
ภาควิชาฟิสิกส์ ประชานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพพล สุทธิศิริ, วท.ม.  
73 หน้า  
ISBN 974-16-2487-5

ฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีออบเคลือบ  
สารเคมี ซึ่งออบสารเคมีประกอบด้วยสารละลายของ แคดเมียมซัลเฟต, โซโอยูเรีย และ  
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยมีค่า pH เท่ากับ 11.5 อุณหภูมิของสารละลายคงที่  $70^{\circ}\text{C}$  และ มี  
การกวนสารละลายตลอดเวลาหลังจากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปแอนนัลในอากาศโดยอุณหภูมิ  
ของการแอนนัลเริ่มจาก  $300^{\circ}\text{C}$  ถึง  $700^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำฟิล์มไป ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค โดย  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โดยใช้เทคนิคการ  
เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีการเปลี่ยน โครงสร้างผลึกจากแบบคิวบิกเป็นแบบ  
เฮกซะโกนอลหลังจากการแอนนัล และ ขนาดเกรนของฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ หลังจากแอนนัลมี  
ค่าเพิ่มขึ้นจาก 16 nm เป็น 51 nm และ ที่อุณหภูมิห้อง ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่หาได้จาก  
สเปกตรัมการส่งผ่านแสงจากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2.45 eV และ  
2.30 eV หลังจากการแอนนัล ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าขณะไม่ฉายแสงและขณะฉายแสง ซึ่งวัดโดย  
วิธี แวนเดอพาฟ พบว่า หลังจากการแอนนัลมีค่าลดลงจาก 115.2  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  เป็น 5.5  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  และ  
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าขณะฉายแสง พบว่ามีค่าลดลงจาก 22.7  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  เป็น 0.3  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  แสดงให้  
เห็นว่าที่อุณหภูมิการแอนนัล  $700^{\circ}\text{C}$  ฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์  
มีการตอบสนองต่อแสงที่สูงมาก

  
ลายมือชื่อนิคม อุ่นใจ

  
ลายมือชื่อประชานกรรมการ

1 / มิ.ช. / 49

Nikom Ounjai 2006: Preparation of Cadmium Sulfide Film on Cadmium Telluride Substrate by Chemical Bath Deposition Method. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Noppadon Suttisiri, M.Sc. 73 pages.  
ISBN 974-16-2487-5

CdS films on CdTe substrates were prepared by chemical bath deposition method (CBD) containing cadmium sulfate, thiourea and ammonium hydroxide at pH 11.5. The temperature of bath was maintained at 70 °C under constant stirring, after that the films were annealed in air, the annealing temperature were varied from 300 °C to 700 °C. SEM was used to investigate the morphology of CdS films. The structure properties were determined by XRD. The XRD pattern of as-deposited film showed the cubic zincblende phase and the films annealed showed the hexagonal wurtzite phase. The grain size of CdS films were increased ( from 15 nm to 51 nm ) with higher annealing temperatures. At room temperature, the energy gaps of CdS were varied from 2.45 eV to 2.30 eV that were determined the transmittance spectra by uv-vis spectrometer. After annealing, value of dark and photo resistivities were measured by Van Der Pauw method. It was found that value of dark resistivities decreased from 115.2 k $\Omega$ .cm to 5.5 k $\Omega$ .cm. And, value of photo resistivities decreased from 22.7 k $\Omega$ .cm to 0.3 k $\Omega$ .cm. A high photosensitive appeared at the 700 °C.

Nikom Ounjai

Student's signature

Noppadon Suttisiri

Thesis Advisor's signature

1 / June / 06

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพพล สุทธิศิริ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และ คอยช่วยเหลือให้ความอนุเคราะห์เสมอมา ขอขอบพระคุณ อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ที่ได้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัยครั้งนี้ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ฉัตรินัย แก้วแดง ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ และอนุเคราะห์เครื่องมือในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรรณิกา คงสาคร และ อาจารย์จักร แสงมา ที่ได้ให้คำแนะนำจนกระทั่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี และ ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อถม และ คุณแม่คำตัน อุ๋นใจ ที่ให้กำเนิด และเป็นกำลังใจในการเรียน ขอขอบพระคุณ คุณพีสุรพรรณ อุ๋นใจ ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุน ขอขอบคุณ คุณศรีไพร อุ๋นใจ และ เด็กหญิงอุ๋นฤทัย อุ๋นใจ ที่คอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา และ ขอกราบขอบพระคุณ ท่านผู้อำนวยการประกาย บัตรศิริมงคล ผู้อำนวยการ โรงเรียนพัคฆภูมิ-วิทยาคาร ผู้บังคับบัญชาที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาต่อของผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา

นิคม อุ๋นใจ

พฤษภาคม 2549

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	11
อุปกรณ์	11
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี	11
เครื่องมือตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์ม CdS/CdTe	13
วิธีการ	33
ผลและการวิจารณ์	37
ลักษณะของฟิล์ม CdS/CdTe	37
ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdS/CdTe	
ที่อุณหภูมิการแอนนีสต่าง ๆ	38
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์	
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
ผลการวิเคราะห์ธาตุ ด้วย EDS	52
ผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/CdTe	54
ผลการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe	58
สรุป	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงลักษณะของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ได้จากการทดลอง	37
2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม $2\theta$ กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 300 °C	38
3	แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และเฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 300 °C	39
4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม $2\theta$ กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 400 °C	40
5	แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และเฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 400 °C	41
6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม $2\theta$ กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 500 °C	42
7	แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 500 °C	43
8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม $2\theta$ กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 600 °C	44
9	แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และเฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 600 °C	45
10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม $2\theta$ กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 700 °C	46
11	แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และเฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 700 °C	47
12	ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDS	53
13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิการแอนนีสลและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdS/CdTe	57

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	ผลการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์ม CdS/CdTe	58
15	แสดงค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะไม่ฉายแสง และขณะฉายแสง	60
16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe กับอุณหภูมิการแอนนีก	64

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของ CdTe ที่ถูกกัดผิวหน้าด้วยวิธี (ก) BrMeoH และ (ข) NP- etch	7
2	แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี	11
3	แสดงการผลิตรังสีเอกซ์ภายในหลอดรังสีเอกซ์	13
4	แผนภาพแสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของมาตรการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
5	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
6	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเลี้ยวเบนที่มุม $2\theta$ ของผลึกออลูมิเนียม	17
7	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	18
8	แสดงโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (ซิงค์เบลนด์) ของ CdS	19
9	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (เวิร์ทไชท์) ของ CdS	19
10	แสดงระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
11	ภาพแสดงโครงสร้างของ Energy Dispersive Spectrometer	22
12	(ก)แสดงภาพถ่ายด้วย SEM ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ใช้ความต่างศักย์ 30 kV กำลังขยาย 25,000 เท่า (ข) แสดงภาพถ่ายด้วย SEM ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียม เทลลูไรด์ที่ใช้ความต่างศักย์ 20 kV กำลังขยาย 5,000 เท่า	25
13	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	26
14	(ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบคิวบิก (ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบเฮกซะโกนอล	27
15	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์	28
16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสง	29
17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(h\nu)^2 \alpha^2$ กับ พลังงาน $h\nu$ โดยที่จุดตัดแกนพลังงานคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน	29

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
18	ภาพด้านบนของสารตัวอย่างที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้า 4 ตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวง เพื่อวัดสภาพต้านทาน โดยวิธี แวน เดอ พาว	30
19	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ แวน เดอ พาว (ก) กระแสไฟฟ้าเข้า ขั้ว A ออก ขั้ว B วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว C และ D (ข) กระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว B ออก ขั้ว C วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว A และ D	31
20	แสดงค่าแก้ $f$ สำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี แวน เดอ พาว	32
21	แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีส และหลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 300 °C ใช้เวลา 60 นาที	38
22	แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีส และหลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้เวลา 60 นาที	40
23	แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีส และ หลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา 60 นาที	42
24	แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีส และ หลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้เวลา 60 นาที	44
25	แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อน แอนนีส และ หลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้เวลา 60 นาที	46
26	แสดงภาพถ่ายฉิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีส ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	48
27	แสดงภาพถ่ายฉิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	48
28	แสดงภาพถ่ายฉิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	49
29	แสดงภาพถ่ายฉิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	49
30	แสดงภาพถ่ายฉิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	50

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
31 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า	50
32 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีกัล ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 150 เท่า	51
33 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของอะตอมของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์ม CdS ที่เคลือบบนผลึก CdTe	52
34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ไม่มีการแอนนีกัล	54
35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 300 °C	54
36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 400 °C	55
37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 500 °C	55
38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 600 °C	56
39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน $h\nu$ กับ $(h\nu)^2(\alpha)^2$ ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 700 °C	56
40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{sheet}$ ) กับอุณหภูมิการแอนนีกัล ขณะไม่ฉายแสง ของฟิล์ม CdS/CdTe	58
41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{sheet}$ ) กับอุณหภูมิการแอนนีกัล ขณะฉายแสง ของฟิล์ม CdS/CdTe	59
42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{sheet}$ ) ขณะที่ไม่ฉายแสงและขณะที่ยาแสง กับ อุณหภูมิการแอนนีกัลของฟิล์ม CdS/CdTe	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
43	63
<p>แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรน กับ สภาพต้านทานไฟฟ้า(ขณะฉายแสง) ของ ฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนัลเดียวกัน</p>	
<p><b>ภาพผนวกที่</b></p>	
1	68
<p>แสดงอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี ( CBD )</p>	
2	69
<p>แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงจุลภาคของฟิล์ม CdS/CdTe โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์-ดิฟแฟรคโตมิเตอร์</p>	
3	70
<p>แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงมหภาคของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM)</p>	
4	71
<p>แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์</p>	
5	72
<p>แสดงการจัดอุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะไม่ฉายแสง</p>	
6	72
<p>แสดงการจัดอุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะฉายแสง</p>	

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CdS	=	แคดเมียมซัลไฟด์
CdTe	=	แคดเมียมเทลลูไรด์
CdS/CdTe	=	แคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์
$R_{\text{Sheet}}$	=	ความต้านทานแผ่น
$T_A$	=	อุณหภูมิแอนนีสล
$E_g$	=	ช่องว่างแถบพลังงาน
D	=	ขนาดเกรน (Grain Size)
CBD	=	Chemical Bath Deposition
SEM	=	Scanning Electron Microscope
EDS	=	Energy Dispersive Spectrometer
XRD	=	X – Ray Diffraction
FWHM	=	Full Width at Half Maximum

# การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี

## Preparation of Cadmium Sulfide Film on Cadmium Telluride Substrate by Chemical Bath Deposition Method

### คำนำ

ปัจจุบันนี้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งธรรมชาติ เช่น การเผาไหม้น้ำมัน, แก๊สธรรมชาติ และ ถ่านหิน การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนพลังน้ำ ไม่สามารถเพิ่มขึ้นจากที่มีอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อม และ ป่าไม้ที่ถูกทำลาย ตลอดจนราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มจะสูงขึ้นทุกวัน การผลิตกระแสไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่งที่มีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้และพัฒนามากขึ้นในอนาคต คือ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากไม่มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแนวโน้มจะพัฒนาไปได้ไกลมากขึ้น คือ เซลล์แสงอาทิตย์ตระกูล CdS/CuInSe<sub>2</sub> และ CdS/CdTe

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชั้น CdS การเตรียมฟิล์ม CdS มีหลายวิธี เช่น สเปคโตรริง (Sputtering), การพอกพูนด้วยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition), การกลายเป็นไอในสุญญากาศ (Vacuum evaporation) และ การออบเคลือบสารเคมี (Chemical bath deposition method ; CBD) แต่การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นชั้น CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบเคลือบสารเคมีมีข้อดีคือ มีต้นทุนในการผลิตต่ำและสามารถผลิตได้พื้นที่ตามที่ต้องการและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการเตรียมฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี โดยการนำฟิล์ม CdS/CdTe ที่ได้ไปแอนนัลในอุณหภูมิต่าง ๆ แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ เพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิการแอนนัลมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มในด้านต่าง ๆ อย่างไรบ้าง

การเตรียมฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี นี้ เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่มี Cd<sup>2+</sup> และ S<sup>2-</sup> ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นชั้นฟิล์ม CdS เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นรองรับ CdTe และการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีนี้ สามารถเตรียมฟิล์มได้ในพื้นที่ตามที่ต้องการและค่าใช้จ่ายในการเตรียมฟิล์มค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการเตรียมฟิล์ม CdS โดยใช้วิธีอื่น จึงเหมาะสมกับอุตสาหกรรมของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (สิงหเดช, 2539)

### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์ม CdS โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี
2. เพื่อศึกษาสมบัติของโครงสร้างเชิงจุลภาคของฟิล์ม CdS/CdTe โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
3. เพื่อศึกษาสมบัติของโครงสร้างเชิงมหภาคของฟิล์ม CdS/CdTe โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
4. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/ CdTe โดยเครื่อง สเปกโตรมิเตอร์
5. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe
6. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิต่าง ๆ

### ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี
2. ทำการเตรียมฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมีจากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น
3. ทำการแอนนिलฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ที่เตรียมได้ โดยใช้อุณหภูมิในการแอนนिलต่าง ๆ กัน
4. ทำการศึกษาสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ผ่านการแอนนिलที่อุณหภูมิต่าง ๆ

## การตรวจเอกสาร

ในการศึกษาวิจัยนี้จะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ทำการออกแบบชุดอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์ม CdS โดยวิธีอาบเคลือบสารเคมี และ ส่วนที่สอง ทำการเตรียมฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ด้วยชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้ ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้าง , สมบัติเชิงแสง และ สมบัติเชิงไฟฟ้า เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของฟิล์ม CdS เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ ดังนี้

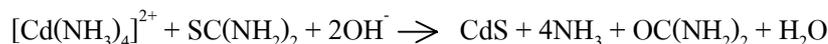
### 1. การเตรียมฟิล์ม CdS โดยวิธีอาบเคลือบสารเคมี

การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) นั้น มีวิธีการที่ใช้ในการเตรียมอยู่หลายวิธีการ เช่น Evaporation, Sputtering, Chemical vapor deposition, Spray deposition, Screen printing และ Chemical Bath deposition (CBD) ซึ่งวิธี CBD นี้เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มในการทำวิจัยครั้งนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมฟิล์ม และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$

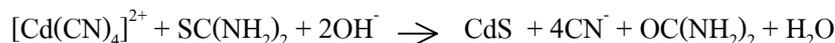
#### 1.1 วิธีการอาบเคลือบด้วยสารเคมี

วิธีการ CBD คือ วิธีการที่จุ่มแผ่นรองรับ(Substrate) ลงในสถานะที่บรรจุสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือของแคดเมียม เช่น  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{C}_4\text{H}_6\text{CdO}_4$ ,  $\text{CdI}_2$  เป็นต้น ร่วมกับ ไซโอยูเรีย ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) ซึ่งจะแตกตัวให้อิออนของซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$  ในสารละลายที่มีความเป็นเบส  $\text{pH} > 9$  กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง CdS เกิดจากการรวมตัวกันของ  $\text{Cd}^{2+}$  ที่แตกตัวจากเกลือของแคดเมียมซึ่งอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนและ  $\text{S}^{2-}$  ที่แตกตัวมาจากไฮโอยูเรีย ในสารละลายอย่างช้า ๆ การเคลือบเป็นฟิล์มบางของ CdS จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{S}^{2-}$  มากเกินกว่าค่าผลิตภัณฑ์ของการละลายของ CdS (Solubility Product ;  $K_{sp}$ ) ซึ่งค่าของ  $K_{sp}$  ของ CdS ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าประมาณ  $1.4 \times 10^{-29}$  จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  เกิดเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ เนื่องจากเกลือของแคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อนซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาเคมีจึงมีหลายแบบ เช่น

แบบที่ 1 Tetraammine complex



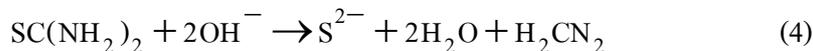
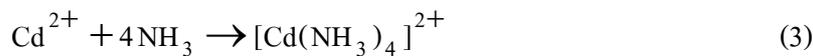
แบบที่ 2 Cyano complex



แบบที่ 3 Triethanolamine (TEA) complex



แต่ส่วนมากนิยมใช้เกลือของแคดเมียมที่อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน Tetraammine สำหรับการวิจัยครั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในรูปแบบที่ 1 เนื่องจากฟิล์มบาง CdS ที่ได้นั้นเตรียมขึ้นมาจาก  $\text{Cd}^{2+}$  ของเกลือแคดเมียมซัลเฟต กับ  $\text{S}^{2-}$  ของโซเดียมไธโอไซยาไนด์ ในสารละลายแอมโมเนีย ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาในกรณีนี้จะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้



การเคลือบฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับมี 2 รูปแบบ ซึ่งแบ่งตามลักษณะการเกิดคือ

1. กระบวนการควบแน่นของไอออนระหว่าง  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) พบว่า  $\text{NH}_3$  ในสมการนี้จะทำให้สารละลายมีสมบัติเป็นเบสและเมื่อเติมเกลือของแคดเมียมลงไปจะทำให้แคดเมียมที่เติมลงไปอยู่ในรูปของสารแขวนลอย  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ดังสมการที่ (2) ซึ่ง  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  นี้มีลักษณะเป็นผงสีขาวและจะเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรองรับ นอกจากนี้เกลือของแคดเมียมยังอยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน  $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  ซึ่งจะปลดปล่อย  $\text{Cd}^{2+}$  ออกมาอย่างช้า ๆ ดังสมการที่ (3) ส่วน  $\text{S}^{2-}$  จะได้มาจากการแตกตัวของไทโอไซยาไนด์ โดยกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) ดังแสดงในสมการที่ (4) ซึ่งอัตราการแตกตัวขึ้นกับค่า pH และ อุณหภูมิของสารละลาย ฟิล์ม CdS จะเกิดขึ้นเมื่อ  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  ทำปฏิกิริยากันและควบแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับ หรือเกิดจาก  $\text{S}^{2-}$  ควบแน่นสารแขวนลอย  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ที่เกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นรองรับแล้วควบแน่นเป็นฟิล์มบาง CdS บนผิวของแผ่นรองรับ ซึ่งกระบวนการนี้จะได้ CdS เป็นฟิล์มบาง

2. กระบวนการดูดซับอนุภาคคอลลอยด์ของ CdS เมื่อเติมเกลือของแคดเมียมและไซโอยูเรียลงไปในภาชนะบรรจุสารเคมี และ ในภาชนะบรรจุสารเคมีจะมีสารละลายของไอออน  $Cd^{2+}$  กับ  $S^{2-}$  ซึ่งจะทำให้เกิดคอลลอยด์ของ CdS คอลลอยด์นี้จะไปเกาะที่ผิวของแผ่นรองรับและจะถูกดูดซับเป็นชั้นของ CdS บนผิวของแผ่นรองรับ และสิ้นสุดการดูดซับเมื่อคอลลอยด์จับตัวกัน และ ตกตะกอนเป็นอนุภาค CdS ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ชั้นของ CdS ที่ได้ในกระบวนการนี้มีลักษณะ เป็นผง

## 1.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์ม CdS

### 1.2.1 สารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี ประกอบด้วยสารละลายแคดเมียมซัลเฟต( $CdSO_4$ ) , สารละลายแอมโมเนีย( $NH_3$ ) และ สารละลายไซโอยูเรีย ( $SC(NH_2)_2$ ) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายทั้งสามจะมีบทบาทมากต่อกระบวนการเตรียมฟิล์ม CdS โดยเฉพาะสารละลายแอมโมเนียและสารละลายไซโอยูเรีย สำหรับบทบาทของสารละลายแอมโมเนียจะพิจารณาได้จากปฏิกิริยาเคมีในรูปของสารเชิงซ้อน Tetraammine ที่ทำให้เกิดฟิล์มบาง CdS พบว่า สารประกอบเชิงซ้อน Tetra – amminecadmium ion  $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$  จะเกิดขึ้นเมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียที่เพียงพอกับ  $Cd^{2+}$  ที่เกิดจากเกลือของแคดเมียมซัลเฟต ดังสมการที่ (3) นอกจากนี้ ปริมาณของเกลือแอมโมเนียที่เหมาะสมจะทำให้  $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$  มีความเสถียร , ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้าลง และ ยับยั้งการเกิดของ  $Cd(OH)_2$  เนื่องจากความหนาของฟิล์มบางในวิธี CBD นี้จะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีการยับยั้งการเกิดของ  $Cd(OH)_2$

### 1.2.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ(Bath)จะส่งผลต่ออุณหภูมิของสารละลายผสมระหว่างสารละลายแคดเมียมซัลเฟต สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายไซโอยูเรีย ในบีกเกอร์โดยอุณหภูมิของน้ำในอ่างจะแตกต่างกับอุณหภูมิของสารละลายผสมในบีกเกอร์ ณ เวลาสิ้นสุดของการเตรียมประมาณ 3-5 °C ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเตรียมฟิล์ม CdS ทั้งนี้อุณหภูมิของสารละลายผสมจะมีผลต่อความหนาและความเป็นผลึก(Crystallinity) ของฟิล์ม โดยเมื่ออุณหภูมิของสารละลายผสมสูงขึ้น ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มมากขึ้น เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิของสารละลายผสม แต่ความหนาของฟิล์มจะคงที่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อ

ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว และ ยังพบอีกว่าเมื่อเตรียมฟิล์ม CdS ที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $70^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป ฟิล์ม CdS ที่ได้จะมีความเป็นผลึกสูงขึ้นด้วย โดยดูจาก พิก ของลวดลายการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของฟิล์ม CdS นอกจากนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายผสมยังส่งผลต่อการเตรียมฟิล์มอีกด้วย เพราะถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายผสมสูง จะทำให้เกิดตะกอนขนาดใหญ่ในสารละลาย ส่งผลทำให้ฟิล์มที่ได้มีคราบของฝุ่นผงขนาดเล็กเกาะอยู่และไม่สามารถล้างออกได้ ดังนั้นอุณหภูมิของสารละลายเริ่มต้น ซึ่งก็คืออุณหภูมิห้องไม่ควรจะสูงเกิน  $26^{\circ}\text{C}$

### 1.2.3 ค่า pH ของสารละลายผสม

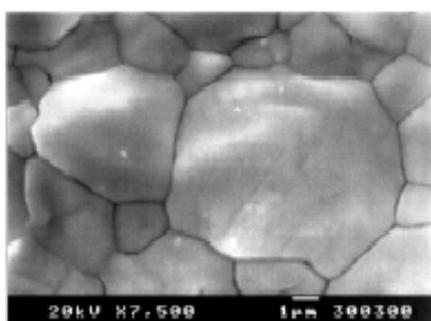
ค่า pH ของสารละลายผสมจะส่งผลต่อความหนาของการส่งผ่านแสง และความเป็นผลึกของฟิล์ม CdS โดยความหนาของฟิล์มจะแปรผันตรงกับ pH ของสารละลายผสม แต่จะไม่แตกต่างกันมากเมื่อ pH ของสารละลายผสมอยู่ในช่วง 8-10 ส่วนค่าการส่งผ่านแสงจะไม่แปรผันตาม pH ของสารละลายผสม โดยพบว่าที่ค่า pH อยู่ในช่วง 8-9 ค่าการส่งผ่านแสงจะต่ำและจะสูงที่สุดที่ pH =7 และที่ pH= 10 ขึ้นไปค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มจะมีค่าสูงแต่น้อยกว่าที่ pH=7 และสำหรับ พิก ของลวดลายการเลี้ยวเบนจะปรากฏเมื่อ pH มีค่าอยู่ในช่วง 8 - 9 ที่ค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้จะไม่ปรากฏ พิก ของลวดลายการเลี้ยวเบน ซึ่งค่า pH ของสารละลายผสมสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อต้องการเพิ่ม pH ของสารละลายผสมสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียที่ใช้ผสมกับสารละลายอีกสองชนิดในการเตรียมฟิล์ม CdS หรือเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียตั้งแต่เริ่มต้น

### 1.2.4 ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์ม

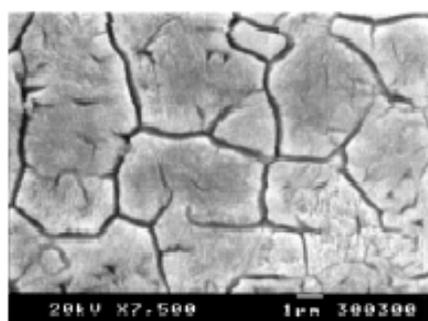
เนื่องจากอุณหภูมิของสารละลายแปรผันตรงกับระยะเวลาการเตรียม ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาของฟิล์ม และ ยังพบว่าค่า pH ของสารละลายจะแปรผันกับระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง นอกจากนี้ ระยะเวลาของการเตรียมฟิล์มบางยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดและความหนาของฟิล์ม CdS (ไปรมา, 2543)

### 1.2.5 การเตรียมแผ่นรองรับ CdTe

การเตรียมแผ่นรองรับนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีนี้ กล่าวคือต้องเตรียมผิวหน้าของแผ่นรองรับในที่นี้คือ CdTe ต้องล้างทำความสะอาดแผ่นรองรับในอ่างล้างอุตราโซนิก เพื่อให้แผ่นรองรับไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการมาเกาะที่ผิวหน้า จากนั้นทำการกัด(etching)ผิวหน้าเพื่อให้ฟิล์ม CdS สามารถเกาะติดได้ดีขึ้นและมีความคงทนไม่หลุดง่าย ซึ่งการกัดผิวอาจจะใช้ โบรมีนในสารละลายเมทานอลหรือ สารละลายผสมระหว่างกรดไนตริก และ กรดฟอสฟอริก สำหรับการทําวิจัยนี้จะใช้สารละลายผสมระหว่าง กรดไนตริก และ กรดฟอสฟอริก ซึ่งภาพถ่ายผิวหน้าของ CdTe จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เปรียบเทียบลักษณะผิวหน้าเมื่อถูกกัดผิวด้วย โบรมีนในสารละลายเมทานอล และ สารละลายผสมระหว่างกรดไนตริก กับกรดฟอสฟอริก ดังภาพที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของ CdTe ที่ถูกกัดผิวหน้าด้วย (ก) BrMeOH และ (ข) NP-etch ที่มา: Batzner (2000)

การเตรียมฟิล์ม CdS ด้วยวิธีออบเคลือบสารเคมีเป็นวิธีการในการเคลือบฟิล์มที่มีความนิยมนำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายเพราะประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมและได้ฟิล์มที่มีคุณภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยมีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ ทั้งที่โดยวิธีออบเคลือบสารเคมีและวิธีการอื่น ๆ ดังนี้

สิงหเดช (2539) ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการเคลือบสารเคมี โดยได้พัฒนาวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับกระจก โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี ฟิล์มที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 65 °C, 75 °C และ 80 °C มีค่าความต้านทานแผ่นประมาณ

$10^{11} \Omega / \square$  และช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 2.47–2.60 eV มีการส่งผ่านแสงประมาณ 80 % สำหรับพลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน และความต้านทานแผ่นของฟิล์มสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเจือด้วยคลอรีนในสารละลายของ  $\text{HgCl}_2$  0.01 molar โดยการจุ่มฟิล์มลงในสารละลายเป็นเวลา 10 นาทีตามด้วยการแอนนัลฟิล์มในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหรือในอากาศที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 20 นาที พบว่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มลดลงมาอยู่ในช่วง  $10^5 - 10^6 \Omega / \square$  ขณะที่ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงประมาณ 2.36 – 2.57 eV

หลังจากนั้น Hiroshi *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษา การเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยวิธี Screen printing สำหรับทำตัวรับรู้การแผ่รังสีของแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light radiation sensor) พบว่า เซลล์สุริยะแบบฟิล์มหนา CdS/CdTe ซึ่งเตรียมบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกโบโรซิลิเกต (borosilicate) โดยวิธี Screen printing และการอบ และการเจือ  $\text{CdCl}_2$  ที่ตกค้างมีผลกระทบกับลักษณะภายในของฟิล์ม CdS ที่อบแล้ว มีส่วนผสมของ Cl และเซลล์ที่ถูกอบที่อุณหภูมิสูง แสดงให้เห็นว่ามีผลตอบสนองต่ำในช่วงความยาวคลื่นสั้น รูปแบบของรอยต่อ CdS/CdTe ที่รอยต่อระหว่าง CdTe ที่ทำการอบ วิธีการเตรียมเซลล์ CdS/CdTe ด้วยวิธี Screen printing นี้ มีการตอบสนองสูงในแถบความยาวคลื่นยาวเปรียบเทียบกับเซลล์ CdS/CdTe ที่ไม่ได้ทำการอบ ทั้งนี้เนื่องจากการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงาน มีผลมาจากชั้นของ  $\text{CdTe}_x\text{S}_{1-x}$  เซลล์ที่เตรียมภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมแสดงให้เห็นเกี่ยวกับสภาพถูกกระตุ้นมีค่าเกือบคงที่ ในช่วง ความยาวคลื่น 530 – 850 nm เซลล์นี้จะถูกใช้เป็นตัวรับรู้การแผ่รังสีของแสงช่วงตามองเห็น

ปีต่อมา Lefdil *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษา ผลของอุณหภูมิของการเตรียมและการแอนนัลฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบเคลือบสารเคมี พบว่า ฟิล์ม CdS ที่เตรียมโดยวิธีนี้มีความบางมาก ฟิล์มเป็นเนื้อเดียวกันยึดติดกันค่อนข้างแข็งแรง และมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสูง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.37 eV จึงถูกนำไปใช้เป็นชั้นหน้าต่างในเซลล์สุริยะ สำหรับการเตรียมนั้นในอ่างเคมีใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กันคือ 70°C, 80°C และ 90°C ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำฟิล์มไปศึกษาด้วยรังสีเอกซ์ จะได้กราฟความความสัมพันธ์ระหว่าง intensity และ  $2\theta$  เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิของอ่างเพิ่มขึ้น กล่าวคือที่อุณหภูมิ 70°C พิกสูงสุดจะอยู่ที่ (002) และ ที่อุณหภูมิ 80°C พิกสูงสุดจะอยู่ที่ (101) และ ที่อุณหภูมิ 80°C พิกสูงสุดจะอยู่ที่ (101) ซึ่งแสดงว่ามีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และเมื่อนำฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิ 70°C ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ นำฟิล์มนี้ไปศึกษาโครงสร้างด้วยรังสีเอกซ์พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง intensity กับ  $2\theta$  มีพิกสูงสุดเปลี่ยนไปคือ พิกแรกอยู่ที่ระนาบ (002) และ พิกที่สองอยู่ที่ระนาบ (101)

ซึ่งแสดงว่ามีโครงสร้างแบบเฮกซะ โกนอล เพราะฉะนั้นอุณหภูมิของอ่างสารเคมี และ การแอนนัล มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างภายในของฟิล์มบาง CdS

ในปีเดียวกันนั้น Touskova *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเตรียมและโครงสร้างภายในของฟิล์ม CdS ที่เตรียมโดยวิธีออบเคลือบสารเคมีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ CdS/CdTe พบว่าเซลล์สุริยะ n-CdS/p-CdTe ที่เตรียมจากวิธีการออบเคลือบสารเคมีของ CdS และ การพอกพูนโดยไฟฟ้าของชั้น CdTe โครงสร้างภายในและคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของชั้นเหล่านี้ ถูกทำการศึกษาเพื่อหาสมรรถนะของเซลล์สุริยะ ส่วนสำคัญมันจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของรอยต่อซึ่งมีผลต่อค่าความต่างศักย์ปลายเปิดที่ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนของแคดเมียมขณะเตรียมฟิล์ม สำหรับการพอกพูน CdS และค่า pH ของสารละลาย จำนวนของชั้น CdS ในเซลล์มีความสำคัญ สำหรับการหาความต่างศักย์ปลายเปิดประมาณ 700 mV ซึ่งมันเกี่ยวข้องกับเงื่อนไขของการพอกพูน CdS ด้วย

หลังจากนั้น ไปรมา (2543) ได้ศึกษากระบวนการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีออบเคลือบสารเคมี พบว่ากระบวนการนำไฟฟ้าผ่านฟิล์มบาง CdS และ รอยต่อที่เกี่ยวข้องของโครงสร้าง Au/CdS/Au , Au/CdS/ZnO(Al) และ Mo/CdS/Au มีรูปการนำ ไฟฟ้าแบบโอห์มมิกสำหรับโครงสร้างMo/CdS/Zno(Al)ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้งที่เป็นแบบโอห์มมิกและไม่เป็นโอห์มมิกและพบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS ที่วัดได้อยู่ในช่วง  $10^2 - 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$

ในปีเดียวกันนั้น จารุทัศน์ และคณะ (2543) ได้ศึกษาการเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์ ซึ่งการศึกษานี้ใช้วิธีออบเคลือบสารเคมี ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ประกอบด้วย  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{NH}_3$  และ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  เตรียมที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  ใช้เวลาประมาณ 60 นาที จากนั้นนำไปแอนนัลภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ในช่วงอุณหภูมิ  $100^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$  นานประมาณ 20 นาที จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ไม่มีแอนนัลจะปรากฏฟิสิกเนื่องจากการเลี้ยวเบนของระนาบ (111), (220) และ (311) ของโครงสร้างแบบคิวบิก แต่เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า  $400^\circ\text{C}$  จำนวนฟิสิกของการเลี้ยวเบน จะเพิ่มขึ้น และ สอดคล้องกับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล ส่วนขนาดของช่องว่างแถบพลังงานและความต้านทานแผ่นจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนัล อีกทั้งการตอบสนองต่อแสงจะลดลง ทั้งในขณะที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น

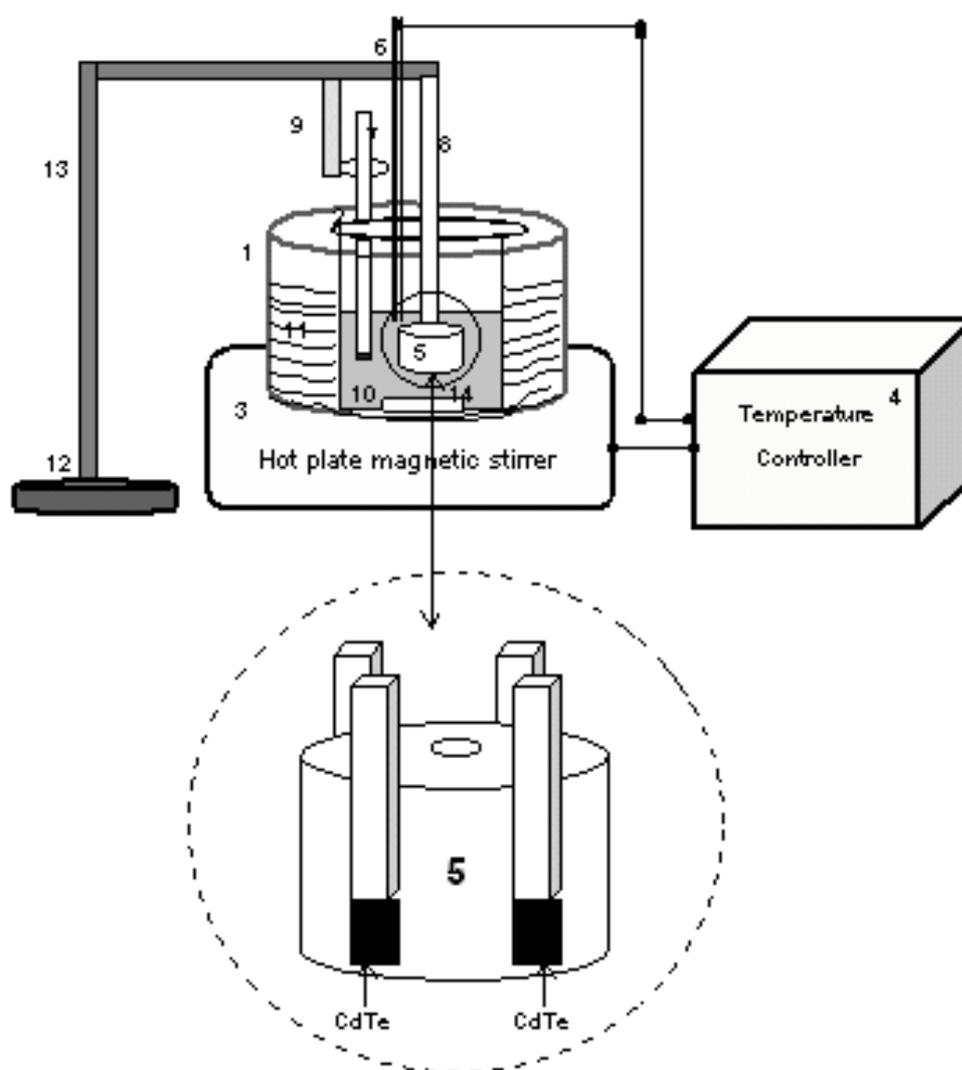
และ Sharma *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษา การปลูกฟิล์มบาง CdS และ CdTe สำหรับใช้ ในการประดิษฐ์ เซลล์สุริยะแบบ n-CdS/p-CdTe พบว่า ฟิล์มบาง n-CdS และ p-CdTe ที่เตรียมด้วย วิธี Chemical spray pyrolysis และ Electrochemical deposition ตามลำดับ ซัลเฟอร์ ในสารละลาย ที่พ่นออกมามากเกินไปจะกระตุ้นให้เกิดเกรนในฟิล์ม CdS โครงสร้างภายในของ ฟิล์ม CdS ขึ้น อยู่กับอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง Cd:S ในสารละลาย ทำให้เกิดเกรนแบบวิวิธพันธ์มากขึ้นขณะ ที่ฟิล์มซึ่งมี ซัลเฟอร์ มากเกินไป เกรนจะมีรูปแบบไม่คงที่ นั่นคือเกรนจะถูกลดความต่อเนื่อง ทำให้ มีความต้านทานมากขึ้นและวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของฟิล์ม CdTe ไม่มีผลกระทบต่อความไม่ต่อ เนื่องของตัวแปรต่าง ๆ เหมือนกับผลกระทบโดย ลวดลายของผลึก และ โครงสร้างภายในซึ่งอยู่ได้ ชั้นของ CdS สมรรถนะของเซลล์ขึ้นอยู่กับชั้นหน้าต่าง CdS และคุณสมบัติของ ฟิล์ม CdS ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้น Cd : S ในสารละลายที่ฉีดพ่นออกมา ปริมาณของ S ที่สูงกว่าในฟิล์ม CdS ทำให้การส่งผ่านแสงไม่มีผลในการเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพของ เซลล์ทำได้โดยการลดสภาพต้านทานไฟฟ้าในฟิล์ม

และในปีล่าสุด Patidar *et al.* (2006) ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์ม CdS โดยวิธี CBD โดยสาร ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มคือ Cd , HCl และ H<sub>2</sub>S จากการศึกษา พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าการ ตอบสนองต่อแสงสูง เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการประดิษฐ์เป็นเซลล์สุริยะและ ตัวรับรู้แสง(photo detector)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีอบบเคลือบสารเคมี



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม CdS/ CdTe โดยวิธีอบบเคลือบสารเคมี

จากภาพที่ 2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง ซึ่งหมายเลขต่าง ๆ ที่แสดงไว้คือ

หมายเลข 1 คือ อ่างสารเคมี ( chemical bath )

หมายเลข 2 คือ บีกเกอร์ขนาด 600 ml

หมายเลข 3 คือ ตัวให้ความร้อนและเครื่องกวนสารละลาย (hot plate and magnetic stirrer)

หมายเลข 4 คือ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ( temperature controller )

หมายเลข 5 คือ พลาสติกเทฟลอนสำหรับใส่แผ่นรองรับ

หมายเลข 6 คือ เทอร์โมคัปเปิล ( thermocouple )

หมายเลข 7 คือ เทอร์โมมิเตอร์

หมายเลข 8 คือ ก้านยึดแผ่นรองรับ

หมายเลข 9 คือ ก้านยึดเทอร์โมมิเตอร์

หมายเลข 10 คือ สารละลายผสม  $\text{CdSO}_4 + \text{SC}(\text{NH}_2)_2 + \text{NH}_4\text{OH}$

หมายเลข 11 คือ น้ำกลั่น

หมายเลข 12 คือ ฐานยึดเสา

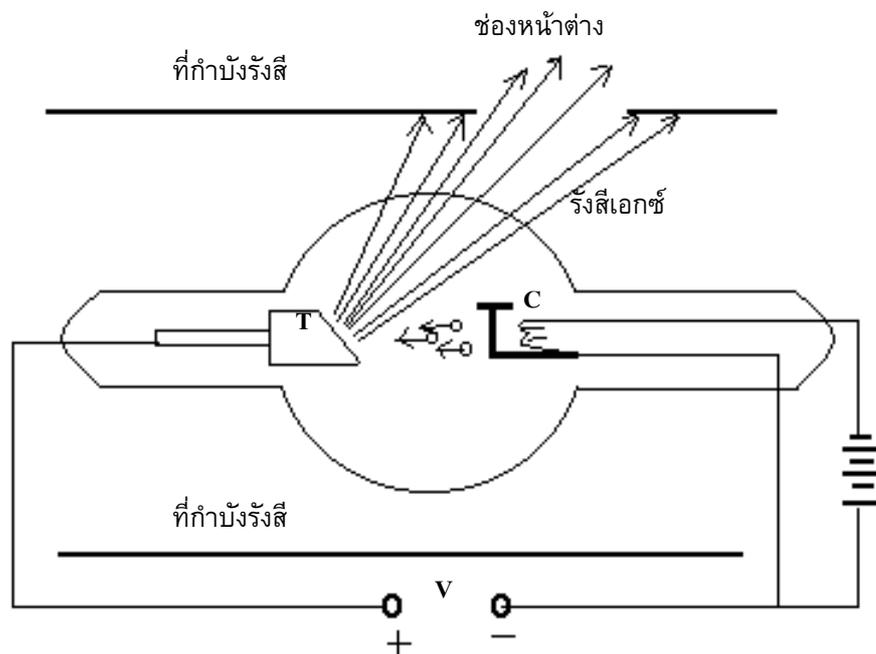
หมายเลข 13 คือ เสาตั้งก้านยึดแผ่นรองรับ

หมายเลข 14 คือ แม่เหล็กกวนสารละลาย

## 2. เครื่องมือตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์ม CdS/CdTe

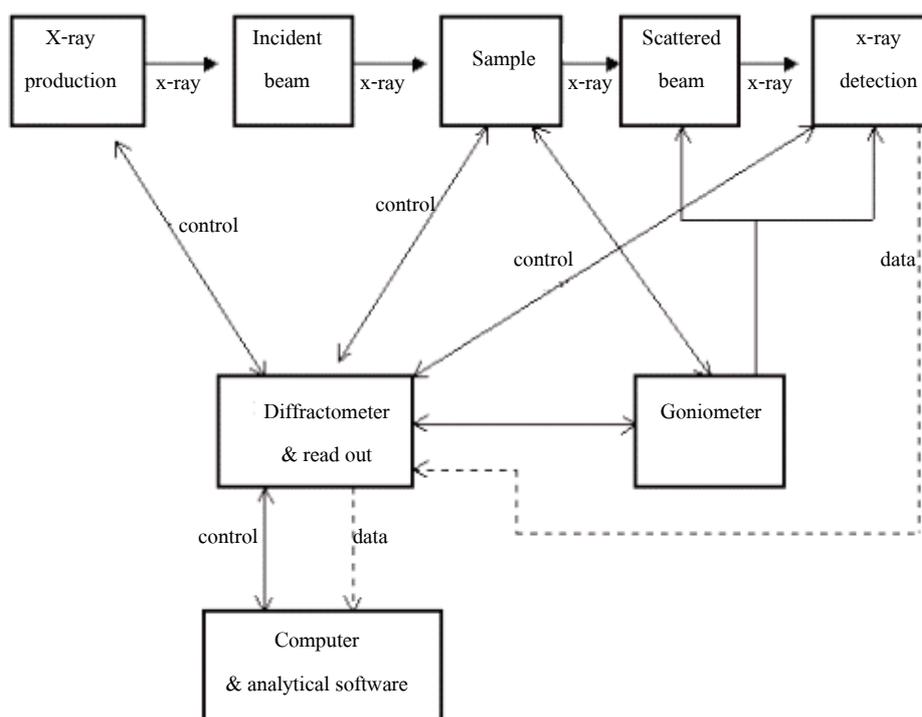
### 2.1 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ( X-ray diffractometer )

รังสีเอกซ์เกิดจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากขั้วคาโทด (C) ไปชนเป้าอาโนด (T) ที่เป็นโลหะหนักมีเลขอะตอมสูง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการผลิตรังสีเอกซ์ภายในหลอดรังสีเอกซ์

หลอดรังสีเอกซ์ จะอยู่ในภายในหลอดกำบังรังสี และมีช่องให้ลำรังสีออกโดยใช้เบอร์เลียมเป็นชัตเตอร์(shutter) ทำหน้าที่เปิดและปิดลำรังสีซึ่งควบคุมโดยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของมาตรการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์จะผ่านแผ่นจานกลมของตัวกรองเบตา( $\beta$ -filter) ซึ่งเป็น Ni, Fe หรือ Mn อยู่ติดกับชัตเตอร์เพื่อให้ลำรังสีความถี่เดียวผ่านไปช่องเลี้ยวโซลเลอร์

ช่องเลี้ยวโซลเลอร์ เป็นแผ่นโลหะบาง ๆ ขนานกันหลายแผ่น แต่ลึแผ่นห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ลดการกระจายของลำรังสี ทำให้ฟิสิกของลำรังสีตกกระทบที่มุมต่ำ ๆ มีสมมาตรมากขึ้น

ช่องเลี้ยวลู่ออก(divergence slit) ทำหน้าที่กระจายลำรังสีเอกซ์ให้ตกกระทบที่พื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวกำหนดด้านยาวของตัวอย่าง เพราะด้านยาวของลำรังสีตกกระทบจะลดขนาดลงตามขนาดมุมที่ลู่ออก ซึ่งมีขนาด  $4^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1/2^\circ$ ,  $1/4^\circ$ ,  $1/6^\circ$ ,  $1/12^\circ$  และ  $1/30^\circ$

หน้ากากลำแสง(*beam mask*) เป็นตัวกำหนดด้านกว้างของตัวอย่าง โดยด้านกว้างจะลดลงตามขนาดของหน้ากากลำแสง ซึ่งมีขนาด 20, 15, 10, 5 และ 2 มิลลิเมตร

ลำรังสีสะท้อนจากตัวอย่างจะผ่านตัวกรองเบตาไปยังช่องเล็กยาวรับ ซึ่งมีขนาด 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.45, 0.75 และ 1.8 มิลลิเมตร

ตัวทำแสงเอกรงค์ เป็นแผ่นผลึกทำหน้าที่กรองรังสีเพื่อให้เฉพาะลำรังสี  $K\alpha$  ความถี่เดียวผ่านเข้าไปตัวตรวจนับสัญญาณ

โกนิโอมิเตอร์(goniometer) ประกอบด้วยแกนหมุน 2 แกน คือ แกนหมุนขับสารตัวอย่าง และ แกนหมุนขับตัวตรวจนับสัญญาณแต่และแกนขับด้วยมอเตอร์ ผ่านเฟือง โดยแกนหมุนทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน แต่การหมุนของแกนทั้งสองต้องสัมพันธ์กัน ถ้าแกนหมุนขับสารตัวอย่างทำมุม  $\theta$  กับลำรังสีตกกระทบ แกนหมุนตัวที่สองต้องขับตัวตรวจนับไปเป็นมุม  $2\theta$  ฉะนั้น โกนิโอมิเตอร์จะควบคุมลำรังสีตกกระทบให้ทำมุม  $\theta$  กับสารตัวอย่างและให้ลำรังสีสะท้อนผ่านเข้าตัวตรวจนับสัญญาณเป็นมุม  $2\theta$

ภายในตัวตรวจนับสัญญาณบรรจุก๊าซซีนอน เมื่อลำรังสีสะท้อนเข้ามาทางหน้าต่างที่ทำจากเบริลเลียมของตัวตรวจนับสัญญาณแล้วส่งไปหน่วยควบคุมมาตรการเลี้ยวเบน(diffractometer control unit) และ คอมพิวเตอร์

หน่วยควบคุมมาตรการเลี้ยวเบน ประกอบด้วยวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ซึ่งควบคุมการผลิตรังสีเอกซ์ ตำแหน่งสารตัวอย่าง โกนิโอมิเตอร์ ตัวตรวจนับสัญญาณ ระบบความปลอดภัย รับคำสั่งและส่งข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลและสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$

### 2.1.1 การศึกษาโครงสร้างผลึก

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยวิธี  $\theta - 2\theta$  ดิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุ-พันธ์ก็ได้ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจนับสัญญาณรังสีเอกซ์ จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่า ผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ(plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอด

แบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน (path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบตั้งสมการ

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (6)$$

เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ

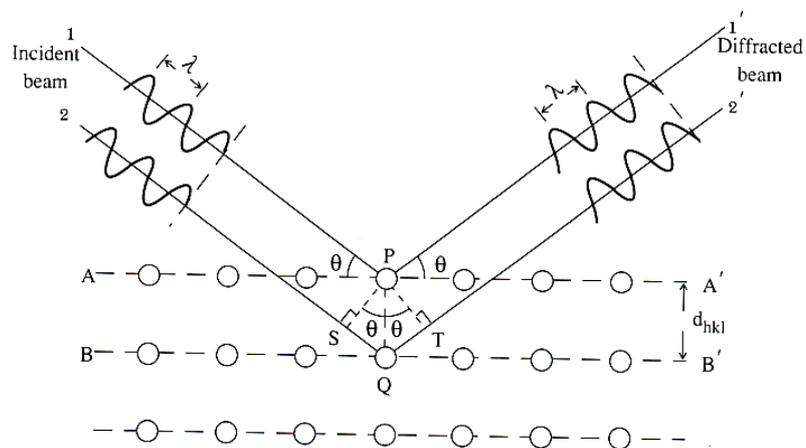
$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบ

ของผลึก

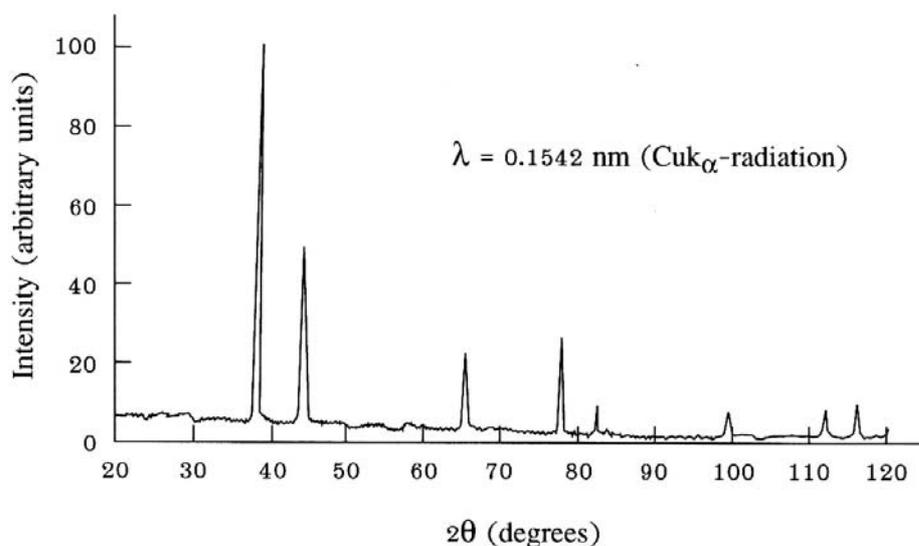
$n$  คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...,  $n$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึก ไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้ว กระจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อน ดังแสดงใน ภาพที่ 4



ภาพที่ 5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์  
ที่มา : บัญชา (2544)



ภาพที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$  ของผลึกอูมิเนียม  
ที่มา : บัญชา (2544)

จากภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน ก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จาก พีค (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก และ ขนาดของ เกรน ค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (คิวบิก) หาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (7)$$

และ สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ (เฮกซะ โกนอล) หาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (8)$$

เมื่อ  $a, c$  คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

$h, k, l$  คือ ระนาบของผลึก

พิจารณาภาพที่ 7 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

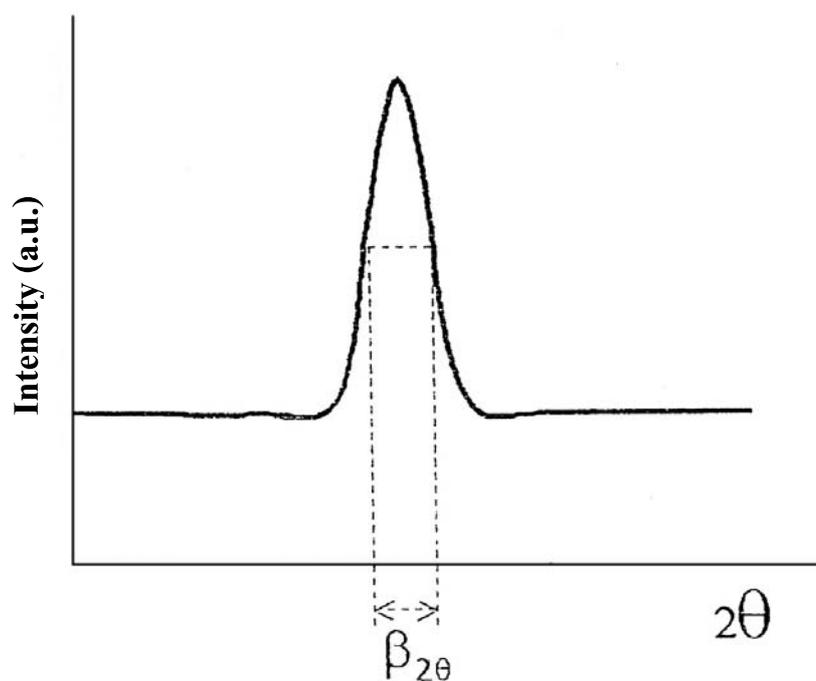
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (9)$$

เมื่อ  $D$  คือขนาดของเกรน (nm)

$k$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

$\beta_{2\theta}$  คือ ระยะ ความกว้างของพีคที่ความเข้มที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความเข้มสูงสุด

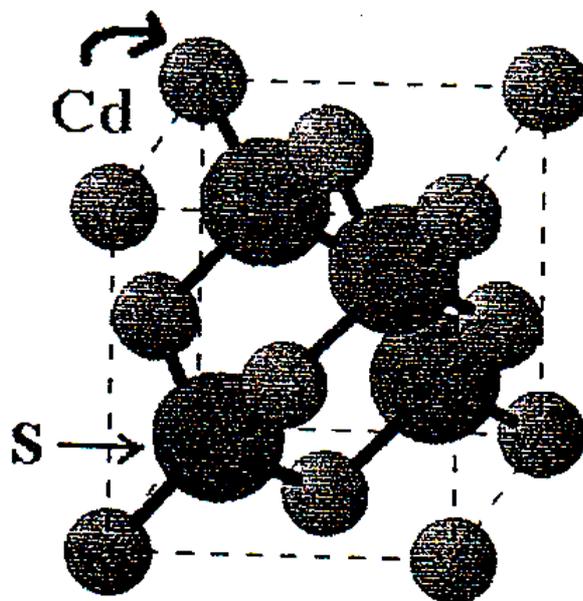
( full width at half maximum of diffraction peak ; FWHM ) (Culity, 1956)



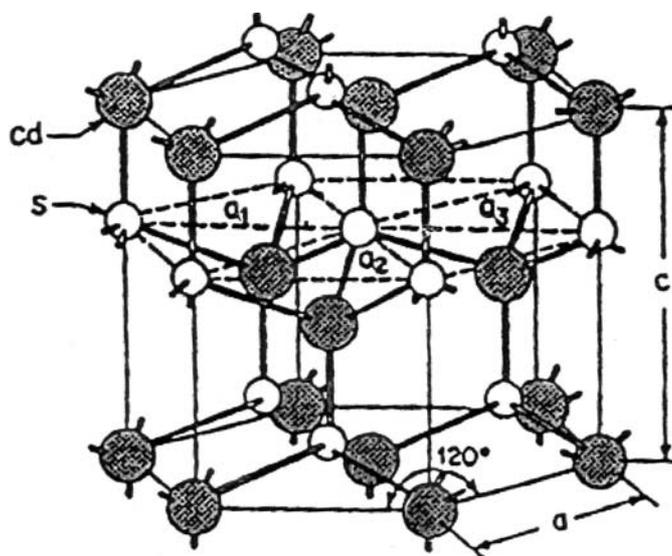
ภาพที่ 7 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ที่มา : บัญชา (2544)

จากความรู้เรื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ผ่านผลึกได้ทำให้มีการพบว่าสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้หลายรูปแบบ เช่นในการทำวิจัยนี้ ผลึก แคดเมียมซัลไฟด์พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและแบบเฮกซะโกนอล ดังแสดงใน ภาพที่ 8 และ ภาพที่ 9 ตามลำดับ



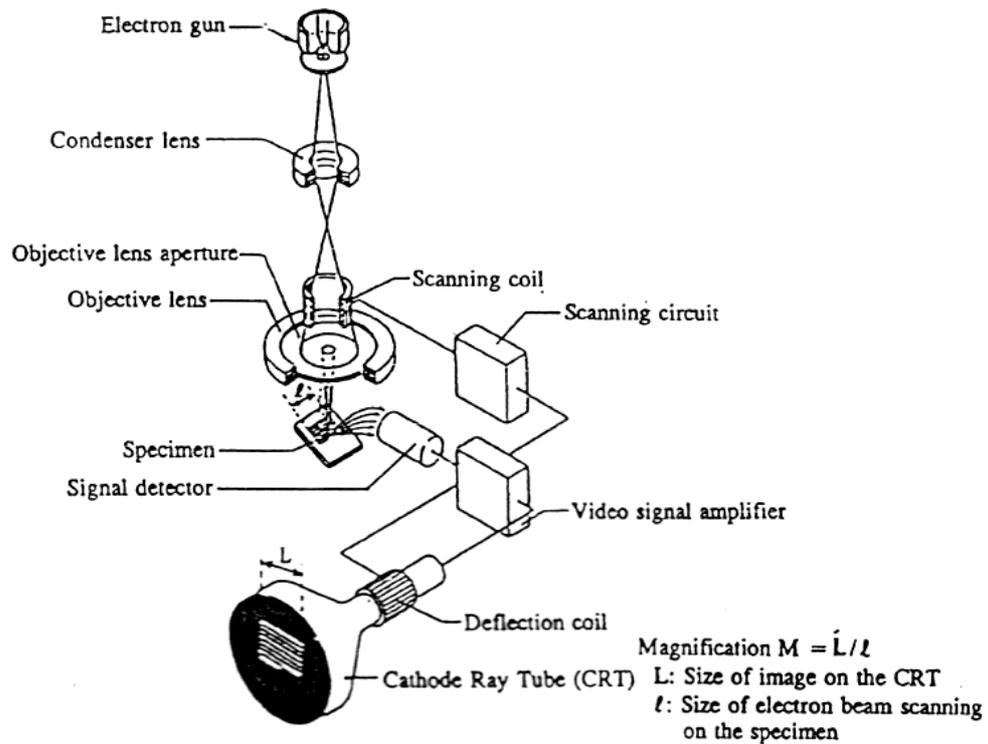
ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (ซิงค์เบลนด์) ของ CdS  
ที่มา: จารุทัศน์ และคณะ (2543)



ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (เวิร์ตไซท์) ของ CdS  
ที่มา: จารุทัศน์ และ คณะ (2543)

## 2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ( Scanning Electron Microscope; SEM)

โครงสร้างพื้นฐานและองค์ประกอบการมองเห็นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาแบบสเตอริโอ (stereo microscope) แต่กลไกการทำงานแตกต่างกัน แหล่งกำเนิดแสงในการเกิดภาพของกล้องสเตอริโอ จะเป็นแสงจากธรรมชาติหรือหลอดไฟ เมื่อแสงส่องกระทบตัวอย่าง แสงจะสะท้อนเข้าสู่เลนส์ที่เป็นแก้วหรือกระจก ผ่านตัวกลางอากาศ โดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และ เลนส์ใกล้ตา (eyepiece lens) จะทำหน้าที่ในการขยายภาพการปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของภาพ ควบคุมด้วยระบบกล และ เรตินาของตาเราเป็นฉากรับภาพ ส่วนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสภาพสุญญากาศ เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง สามารถบังคับคลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นสั้นมาก ๆ ได้ เช่น ถ้าใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอน 20 kV จะได้ลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.08 อังสตรอม เป็นต้น เลนส์รวมแสง (condenser lens) และเลนส์ใกล้วัตถุ เป็นระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการบีบลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย (electron probe) ที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ให้โฟกัสลงบนตัวอย่าง จากนั้นลำแสงรูปกรวยจะถูกบังคับด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าชุดควบคุมการสแกน (scanning coil) ให้เคลื่อนไปบนสารตัวอย่าง ในแนวนอนและแนวตั้งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายระบบสแกนของโทรทัศน์ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อลำแสงรูปกรวยเคลื่อนบนผิวตัวอย่างจะถูกรวบรวมโดยอุปกรณ์วัดสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วผ่านท่อนำแสง ไปยังเครื่องขยายแสง (cathode ray tube; CRT) ลำแสงที่กราดเป็นเส้นบนจอรับภาพจะเคลื่อนไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนผิวตัวอย่างที่ถูกควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 10

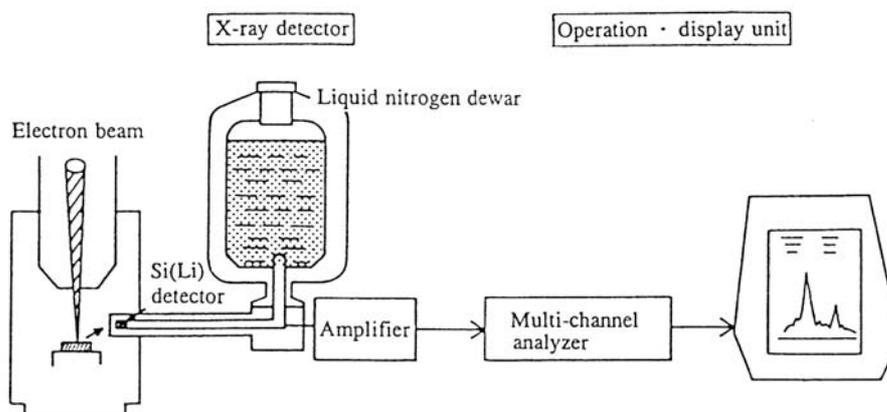


ภาพที่ 10 แสดงระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิ(primary electrons) ตกกระทบตัวอย่างนอกจากจะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ใช้ประโยชน์ในการศึกษารูปพรรณสัณฐานและลักษณะโครงสร้างไมโครบนพื้นผิวตัวอย่างแล้วยังมีสัญญาณอื่น ๆ ที่เกิดขึ้น และเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในเชิงวิทยาศาสตร์ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับของรังสีเอกซ์ เป็นต้น

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อตกกระทบตัวอย่างแล้วสูญเสียพลังงานไปบางส่วนให้กับอะตอมของตัวอย่างแล้วสะท้อนกลับ มีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง มีประโยชน์ในการศึกษาตัวอย่างที่มีผิวเรียบและสามารถบอกได้ว่าประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมแตกต่างกันอยู่หรือไม่ อุปกรณ์วัดสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะเป็นชนิดสารกึ่งตัวนำ ซึ่งติดตั้งอยู่ใต้ขั้วแม่เหล็กของเลนส์ชุดสุดท้าย

ส่วนรังสีเอกซ์เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ที่มีพลังงานสูงเคลื่อนที่ชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลใกล้นิวเคลียส แล้วเคลื่อนที่ออกไปจากออร์บิทัลดังกล่าว ทำให้เกิดที่ว่างในออร์บิทัลนั้น อิเล็กตรอนในออร์บิทัลถัดไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอกซ์ และมีความยาวคลื่นเฉพาะระดับพลังงานของอะตอมของธาตุนั้น ๆ สามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพและปริมาณ อุปกรณ์ที่นิยมใช้ติดเข้ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อใช้วัดรังสีเอกซ์เรียกว่า Energy Dispersive Spectrometer (EDS) ซึ่งประกอบด้วยหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกซึ่งจะทำงานภายใต้อุณหภูมิเย็นจัด โดยมีแท่งทองแดงเป็นตัวนำความเย็นจากถังไนโตรเจนเหลวไปยังหัววัดรังสี ดังภาพที่ 11 ผลึกจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรังสีเอกซ์เป็นพลังงานไฟฟ้า เข้าสู่เครื่องวัดที่เรียกว่า Multichannel Analysis (MCA) ซึ่งจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าไว้ในหน่วยความจำ (Memory) ที่อยู่ภายในเครื่อง จะมีโปรแกรมสำเร็จช่วยในการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ สเปกตรัมและผลการวิเคราะห์ จะแสดงออกบนจอคอมพิวเตอร์หรือพิมพ์ลงในกระดาษบันทึก EDS



ภาพที่ 11 ภาพแสดงโครงสร้างของ Energy Dispersive Spectrometer

### 2.1.1 หลักการพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากพฤติกรรมของโฟตอนซึ่งมีธรรมชาติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค จะมีความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมกับความยาวคลื่นคือ

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (10)$$

แทนค่า  $\frac{V}{c}$  และ  $\frac{1}{\lambda}$  จะได้

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (11)$$

เมื่อ  $h = 6.625 \times 10^{-34}$  จูล .วินาที  
 $c = 2.9998 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

ในกรณีของอิเล็กตรอนที่มีมวล  $m$  มีความเร็ว  $v$  โมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็น  $mv$  ดังนั้นจากสมการที่ 11 จะได้ จะได้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนหรือความยาวคลื่นของเดอบรอย คือ

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (12)$$

ขณะที่อิเล็กตรอนมีค่าประจุไฟฟ้า  $q$  เท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมป์ ถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าโดยมีศักย์ไฟฟ้าแรง พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็น

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (13)$$

จากสมการที่ 12 และ 13 จะได้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนเป็น

$$\lambda = \sqrt{\frac{h^2}{2mqV}} \quad \text{โดยที่ } V \text{ มีหน่วยเป็น โวลต์} \quad (14)$$

ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าแรง มีค่าเกินกว่า 50 kV ความเร็วอิเล็กตรอนจะเข้าใกล้ความเร็วแสง มวลของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปจากมวลที่หยุดนิ่ง ( $m_0$ ) ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ ดังนั้นมวลของอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็น

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

ความยาวคลื่นจะมีค่าเป็น

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (15)$$

และเนื่องจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ได้จากสนามไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ

$$qe = mc^2 - m_0c^2 \quad (16)$$

ดังนั้นสมการของความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนเมื่อศักย์ไฟฟ้าเร่งเกินกว่า 50 kV จึงมีค่าเป็น

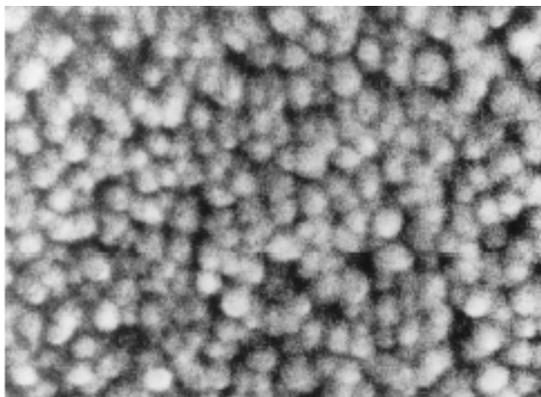
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 qV + \frac{2q^2 V^2}{c^2}}} \quad (17)$$

หรือ

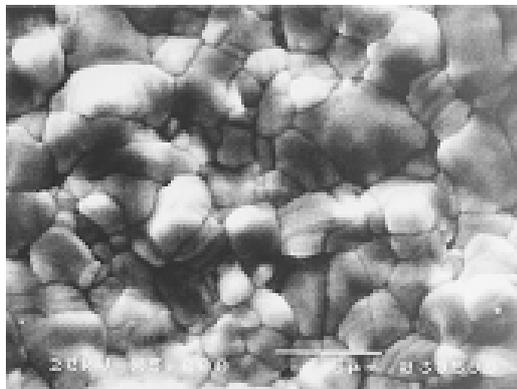
$$\lambda \approx \frac{12.3}{\sqrt{V}} \text{ \AA} \quad (18)$$

จากสมการที่ 18 จะเห็นว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเร่งเพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ดังนั้นถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าเร่งกับลำอิเล็กตรอน 60 กิโลโวลต์ ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนในคอลัมน์สุญญากาศจะมีค่าประมาณ 0.05 อังสตรอม ซึ่งถ้าเทียบกับความยาวคลื่นของแสงแล้ว อิเล็กตรอนความเร็วสูงมีความยาวคลื่นสั้นมาก

ตัวอย่างภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นภาพถ่ายผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ และ สารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ แสดงดังภาพที่ 12



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 (ก) แสดงภาพถ่ายด้วย SEM ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ใช้ความต่างศักย์ 30 kV กำลังขยาย 25,000 เท่า

(ข) แสดงภาพถ่ายด้วย SEM ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ใช้ความต่างศักย์ 20 kV กำลังขยาย 5,000 เท่า

ที่มา: Touskova (1998)

ที่มา: Batzner (2000)

### 2.3 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)

สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้แสง ที่ตามองเห็น และ แสงเหนือม่วง มีส่วนประกอบของเครื่องวัดที่สำคัญ 5 ส่วน สำหรับสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้การดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ คือ

1. แหล่งกำเนิดอันหนึ่งหรือแหล่งกำเนิดหลายอันที่มีรังสีช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ซึ่งจะมีความยาวคลื่นในช่วง 200 นาโนเมตร ถึง 800 นาโนเมตร
2. ตัวทำแสงเอกรงค์(monocromator)
3. ที่จับตัวอย่างให้ลำแสงจากตัวทำแสงเอกรงค์ผ่าน ที่ใส่ตัวอย่างสำหรับแสงเหนือม่วง และแสงที่ตามองเห็น ใช้ ซิลิกา ถ้าใช้เพียงแสงที่ตามองเห็นสามารถใช้แก้วกับพลาสติกได้
4. เครื่องวัดความเข้มแสงที่ส่งผ่านสารตัวอย่าง
5. เครื่องแสดงผลให้เราดูหรือบันทึกผลลัพธ์ออกมา

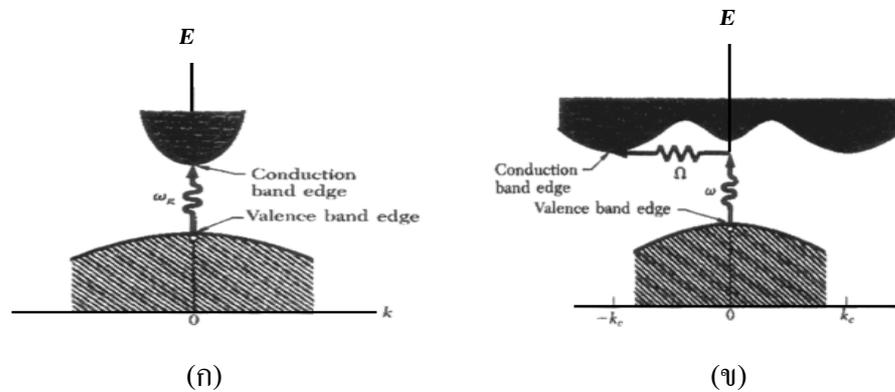
ในการหาช่องว่างแถบพลังงาน การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยการส่งผ่านแสงวิเคราะห์การดูดกลืนแสง เพื่อหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

$$\alpha = -(1/d) \ln \{ [-(1-R)^2 + [(1-R)^4 + 4T^2R^2]^{1/2}] / 2TR^2 \} \quad (19)$$

เมื่อ  $d$  เป็นความหนาของผลึก  $R$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน และ  $T$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งเท่ากับ  $I_t/I_0$  เมื่อ เป็นความเข้มแสงเมื่อทะลุผ่านผลึกและที่ตกกระทบผลึก และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำ แคดเมียมซัลไฟด์มีการดูดกลืนพลังงานแบบตรง ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าเท่ากับ

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (\text{ศุภกิจ, 2543}) \quad (20)$$

ลักษณะของการดูดกลืนพลังงานแบบตรงและแบบเฉียงของสารกึ่งตัวนำแสดงได้ดังภาพที่ 13



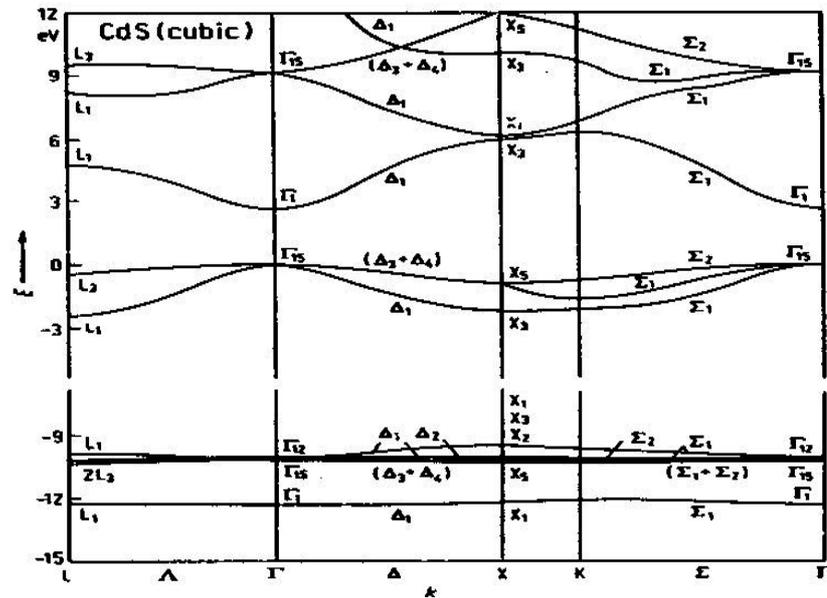
ภาพที่ 13 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

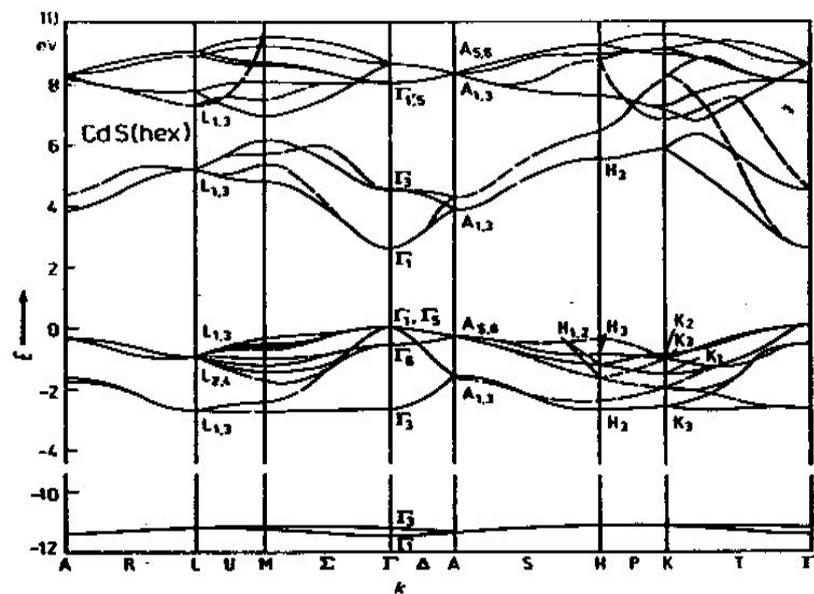
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

ที่มา: Kittel (1971)

สารกึ่งตัวนำ แคดเมียมซัลไฟด์ มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน 2 แบบ คือ โครงสร้างแถบพลังงานของโครงผลึกแบบคิวบิก และโครงสร้างแถบพลังงานของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนอล ดังแสดงใน ภาพที่ 14 (ก) และ (ข)



(ก)



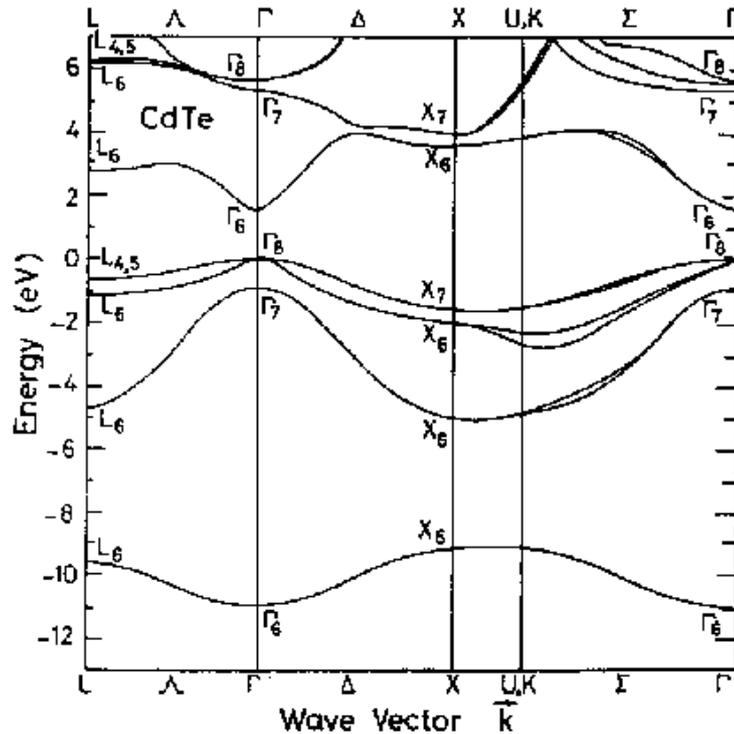
(ข)

ภาพที่ 14 (ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบคิวบิก

(ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบเฮกซะโกนอล

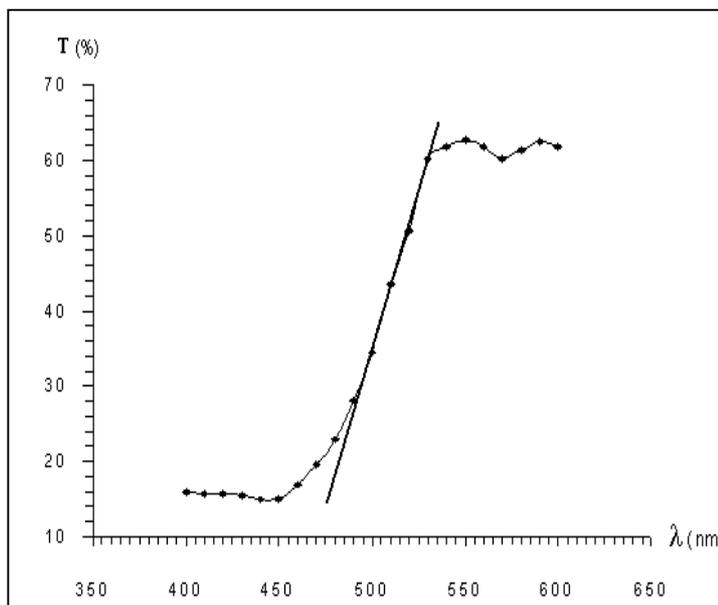
ที่มา: Ridley (1999)

สารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ซึ่งใช้เป็นแผ่นรองรับในการทำฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ ในครั้งนี้มีการดูคลื่นพลังงานแบบตรง ซึ่งแสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์ได้ดังแสดงในภาพที่ 15

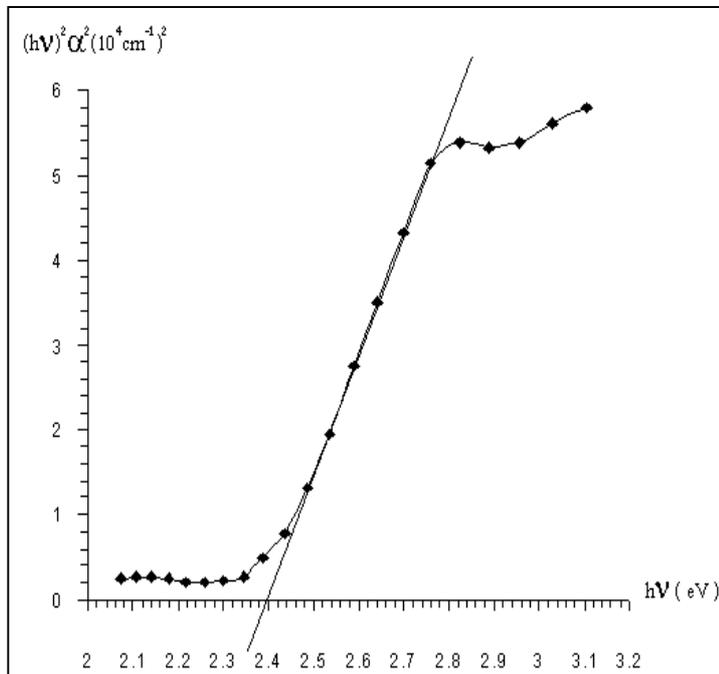


ภาพที่ 15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์  
ที่มา: Ridley (1999)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกระทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน แสดงได้ ดังภาพที่ 16 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบการนำ และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงของกราฟระหว่าง  $(h\nu)^2$  กับ พลังงาน  $h\nu$  ซึ่งจะไปตัดกับแกนในแนวนอนที่พลังงานสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ดังภาพที่ 17 วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด (จารุทัศน์ และคณะ, 2543)



ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสง



ภาพที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(h\nu)^2 \alpha^2$  กับ พลังงาน  $h\nu$  โดยที่จุดตัดแกนพลังงานคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน

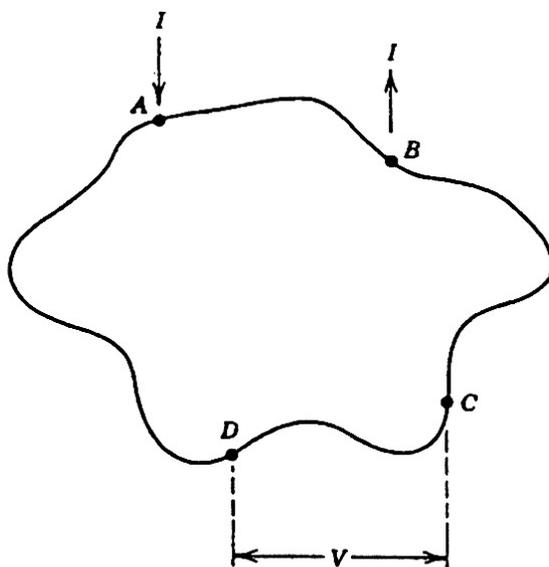
## 2.4 ชุดอุปกรณ์วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

### 2.4.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพาว (Van Der Pauw Method)

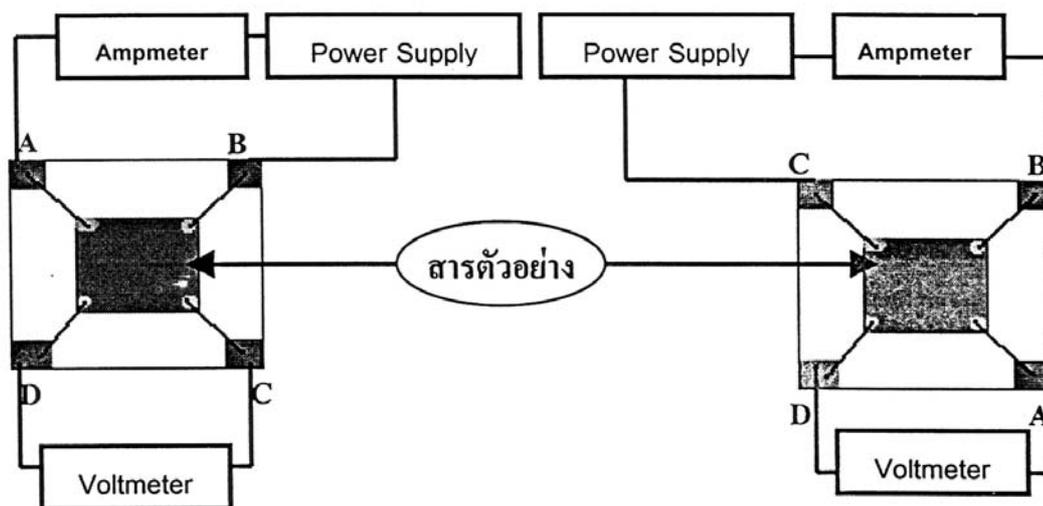
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธี แวน เดอ พาว นั้น จะให้ค่าที่ถูกต้องโดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

เป็นวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสำหรับวัตถุรูปทรงต่างๆ ไป เช่นในภาพที่ 18 โดยการต่อขั้วไฟฟ้าตามเส้นรอบวงที่สารตัวอย่างจำนวน 4 จุด คือ A, B, C และ D โดยมีสองขั้วต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแอมมิเตอร์ ส่วนอีกสองขั้วต่อกับโวลต์มิเตอร์



ภาพที่ 18 ภาพด้านบนของสารตัวอย่างที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้า 4 ตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวง เพื่อวัดสภาพต้านทานโดยวิธี แวน เดอ พาว



(ก)

(ข)

ภาพที่ 19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ แวน เดอ พา

(ก) กระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว A ออก ขั้ว B วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว C และ D

(ข) กระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว B ออก ขั้ว C วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว A และ D

เมื่อทำการต่อวงจรดังภาพที่ 19 และทำการบันทึกค่า  $V_{DC}$  (ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว D และ C),  $V_{BC}$  (ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และ C),  $I_{AB}$  (กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้ว A และ B),  $I_{AD}$  (กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้ว A และ D) จะสามารถหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$R_{ABCD} = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \quad (21)$$

$$R_{BCDA} = \frac{V_{AD}}{I_{BC}} \quad (22)$$

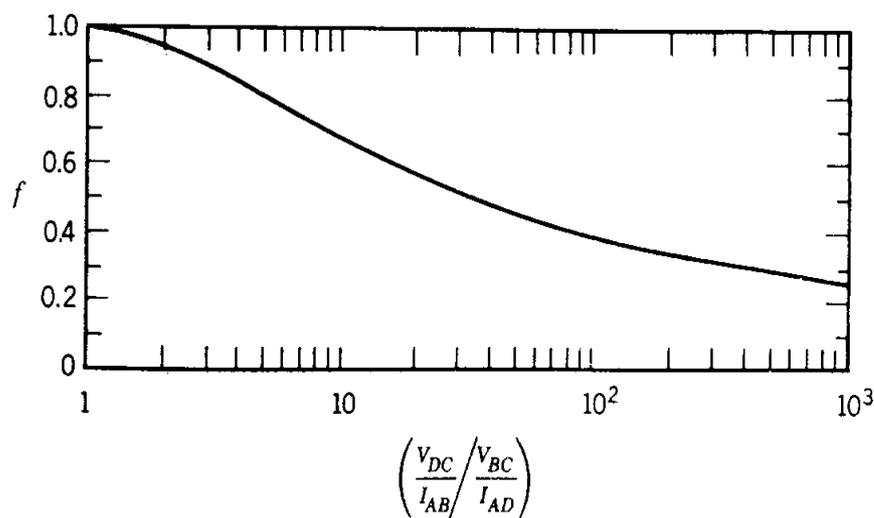
ค่าความต้านทาน  $R_{ABCD}$  และ  $R_{BCDA}$  นำไปหาสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการ

$$\exp\left(-\frac{\pi}{\rho}DR_{ABCD}\right) + \exp\left(-\frac{\pi}{\rho}DR_{BCDA}\right) = 1 \quad (23)$$

หรือ

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left( \frac{R_{ABCD} + R_{BCDA}}{2} \right) f \quad (24)$$

เมื่อ  $f$  คือค่าแก้ไขซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วน  $R_{ABCD}/R_{BCDA}$  ซึ่งสามารถหาค่าได้จากกราฟ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงค่าแก้ไข  $f$  สำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี แวน เดอ พาว

โดยที่  $\rho$  เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้า และ  $d$  เป็นความหนาของสารตัวอย่างซึ่งสม่ำเสมอ ในการทดลองอาจมีการเปลี่ยนขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้าเข้าและขั้วที่ใช้วัดความต่างศักย์ เช่น อาจจะให้กระแสเข้าขั้ว C ออก D แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว A และ B และให้กระแส เข้าขั้ว D ออก A แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และ C ซึ่งจะทำให้ได้  $R_{CDAB}$  และ  $R_{DABC}$  ตามลำดับ เมื่อนำ  $R_{ABCD}$  และ  $R_{BCDA}$ ,  $R_{BCDA}$  และ  $R_{CDAB}$ ,  $R_{CDAB}$  และ  $R_{DABC}$ ,  $R_{DABC}$  และ  $R_{ABCD}$  แทนค่าในสมการที่ 24 จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด 4 ค่าด้วยกันและเมื่อเฉลี่ยค่าทั้งสี่ก็จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้า ตามที่ต้องการ (กรกฎ, 2540)

## วิธีการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์ม Cds บนแผ่นรองรับ CdTe โดยวิธีออบเคลือบสารเคมี หลังจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในอากาศ และ นำฟิล์มที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค และ วัดความหนาของฟิล์มโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด , ศึกษาคุณสมบัติทั้งเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณเพื่อหาองค์ประกอบอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ภายในฟิล์มโดยเทคนิค EDS , ศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อบอกลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์ม และ คำนวณค่าช่องแถบพลังงาน ( $E_g$ ) และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยวิธี แวน เดอ พาว ( van der pauw method )

### 1. ขั้นตอนในการทดลอง

1.1 ประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มโดยวิธีออบเคลือบสารเคมีดังแสดงในภาพที่ 2

1.2 ขั้นตอนในการเตรียมแผ่นรองรับ CdTe

นำผลึก CdTe ที่มีอยู่ทำความสะอาดด้วยน้ำปอดคประจุ หลังจากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์สูง ( 2000 ) แล้วนำไปขัดด้วยผงขัดเพชร ( Diamond polishing ) หลังจากนั้นล้างด้วยอะซิโตน และ เมทานอล สังเกตว่าผิวหน้าของผลึก CdTe มีความเรียบ และ มันวาว จากนั้นกัดผิว (etching) ด้วย NP-etch โดยใช้กรดไนตริก ( 65 % ) 1 ml , กรดฟอสฟอริก ( 85 % ) 88 ml และน้ำปอดคประจุ 30 ml โดยใช้เวลาในการกัดผิวหน้า 40 วินาที

1.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม Cds เป็นดังนี้

1.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์มดังภาพที่ 2

1.3.2 เติมน้ำปอดคประจุ 200 ml ในบีกเกอร์ ขนาด 600 ml แล้วนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิซึ่งภายในบรรจุน้ำกลั่นโดยที่ระดับน้ำกลั่นต้องสูงกว่าระดับของสารละลายผสมภายในบีกเกอร์ หลังจากนั้นตั้งอุณหภูมิของอ่างให้คงที่ ที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.3.3 เตรียมสารละลาย  $\text{CdSO}_4$  (0.025 M) ใน  $\text{NH}_4\text{OH}$  (25 %) (3 M) ปริมาตร 50 ml ไว้ในบีกเกอร์ 100 ml

1.3.4 เตรียมสารละลาย  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  (0.035 M) ปริมาตร 50 ml ไว้ในบีกเกอร์ 100 ml

1.3.5 ทำการบรรจุผลึก CdTe ในเทฟลอนสำหรับใส่แผ่นรองรับที่เตรียมไว้ดัง ภาพที่ 2

1.3.6 ใส่แม่เหล็กกวนสารละลายลงในบีกเกอร์ของสารละลายผสม

1.3.7 หลังจากอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิกองที่  $70^\circ\text{C}$  ให้เติมสารละลายผสม  $\text{CdSO}_4$  กับ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ลงไปในบีกเกอร์กวนสารละลายไปเรื่อย ๆ ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำแผ่นรองรับ CdTe ที่เตรียมไว้ใส่ลงไปในการละลายโดยให้ CdTe จุ่มอยู่ในสารละลายผสมพอประมาณ กวนสารละลายต่อไปอีกประมาณ 5 นาที จากนั้นเติมสารละลาย  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  ลงไปในบีกเกอร์ วัดค่า pH ของสารละลายแล้วบันทึกไว้ และ สังเกตสีของสารละลาย กวนสารละลายต่อไปเรื่อย ๆ จนครบ 60 นาที จากนั้นหยุดการกวนแล้วนำ CdTe ขึ้นจากบีกเกอร์ นำไปล้างในน้ำไหลตลอดประจุในเครื่องล้างอุตราโซนิกประมาณ 10 นาที เพื่อกำจัดตะกอน สังเกตสีและลักษณะของฟิล์ม CdS ที่อยู่บน CdTe

1.3.8 นำแผ่นรองรับ CdTe ที่มีฟิล์ม CdS เคลือบอยู่ด้านบนไปอบโดยใช้อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  ประมาณ 60 นาที สังเกตสีของฟิล์ม CdS บนผลึก CdTe

1.3.9 นำฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ที่เตรียมได้ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$  และ  $700^\circ\text{C}$  ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการแอนนัลอุณหภูมิตละ 1 ชั่วโมง

1.3.10 นำฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ที่ผ่านการแอนนัลแล้วไปศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ

## 2. การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม CdS/CdTe

### 2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ศึกษาโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยใช้หลอดทองแดง ใช้ความต่างศักย์ 30 kV ใช้กระแสไฟฟ้า 25 mA ใช้ความยาวคลื่น 1.5418 Å

สถานที่ทำการศึกษา: หน่วยปฏิบัติการผลึกและรังสีเอกซ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

ศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้ ความต่างศักย์ 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวความเป็นผลึก และ ขนาดของผลึก ใช้ EDS เพื่อหาชนิดของสารที่เคลือบฟิล์ม ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

สถานที่ทำการศึกษา: ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### 2.3 การศึกษาสมบัติเชิงแสง

ศึกษาโดย สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้แสงที่ตามองเห็น และ แสงเหนือม่วง โดยวัดค่าตั้งแต่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ถึง 900 นาโนเมตร เพื่อศึกษาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม แคดเมียมซัลไฟด์

สถานที่ทำการศึกษา: ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

วัดโดยวิธีของ แวน เดอ พาว (van der pauw method )

สถานที่ทำการศึกษา: ห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## 2.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมบัติด้านต่าง ๆ

โดยนำผลที่ได้จากการศึกษาโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และ การศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มาเทียบความเป็นผลึก และ ขนาดของผลึก นำผลที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์เพื่อหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน และ เปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของสารตัวอย่างที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

## 3. สถานที่ทำการวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย: หน่วยปฏิบัติการผลึกและรังสีเอกซ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 4. ระยะเวลาทำการวิจัย

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2545 ไปสิ้นสุดเมื่อ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2548

## ผลและการวิจารณ์

### 1. ลักษณะของฟิล์ม CdS/CdTe

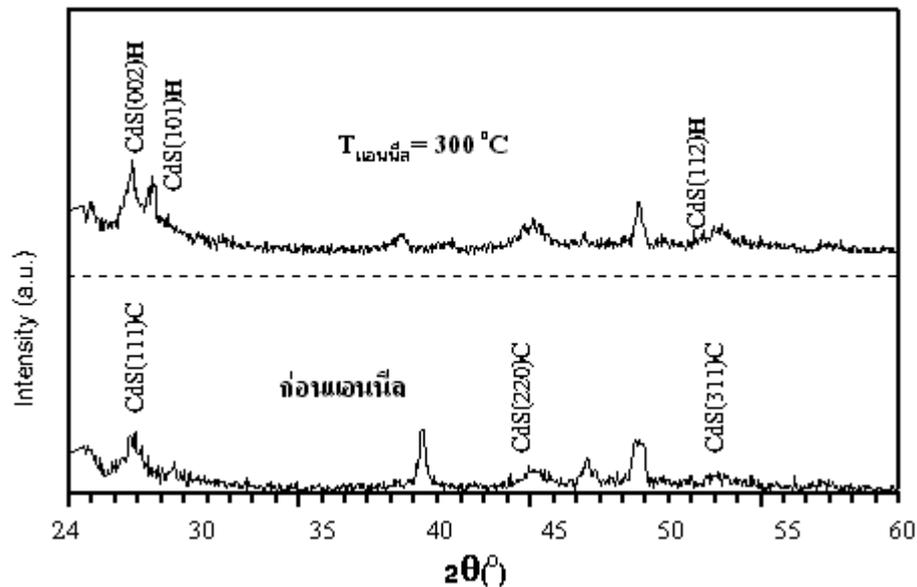
ตารางที่ 1 แสดงลักษณะของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ได้จากการทดลอง

ฟิล์ม CdS/CdTe		ลักษณะของฟิล์ม
ฟิล์ม ไมแอนนิล		มีสีเหลืองค่อนข้างเข้ม และ ผิวหน้าของฟิล์มไม่มีความสม่ำเสมอมากนัก
ฟิล์มแอนนิลที่อุณหภูมิ 300 °C		มีสีเหลืองค่อนข้างเข้ม มีความมันวาว และมีลักษณะเรียบและสม่ำเสมอ
ฟิล์มแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 °C		มีสีเหลืองอ่อนและมีความมันวาวและผิวค่อนข้างสม่ำเสมอมากขึ้น
ฟิล์มแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 °C		มีสีเหลืองอ่อน มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และมีผิวเรียบและมันวาว
ฟิล์มแอนนิลที่อุณหภูมิ 600 °C		ฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเขียวขุ่นปนเหลือง
ฟิล์มแอนนิลที่อุณหภูมิ 700 °C		ฟิล์มมีสีเขียว ความหนาของชั้น CdS ลดลง และ ผลึก CdTe มีความมันวาวมากขึ้น

## 2. ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนัลต่าง ๆ

2.1 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C ในอากาศ เวลาการแอนนัล 60 นาที

2.1.1 ผลการศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ก่อนแอนนัลและหลังการแอนนัล



ภาพที่ 21 แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนัล และหลังจากแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 °C ใช้เวลา 60 นาที

จากภาพสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีก่อนแอนนัลและหลังแอนนัลได้ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $2\theta$  กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนัล 300 °C

ก่อนแอนนัล		หลังแอนนัล	
$2\theta$ (°)	(hkl)	$2\theta$ (°)	(hkl)
26.68	CdS(111)C	26.59	CdS(002)H,(111)C
27.55	CdTe(220)C	29.35	CdTe(102)H
43.89	CdS(220)C	28.42	CdS(101)H
51.88	CdS(311)C	51.91	CdS(112)H

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ CdS ที่เป็นแบบลูกบาศก์ และ แบบ เฮกซะ โกนอล ซ้อนกันอยู่ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ โครงสร้าง ได้ดังนี้

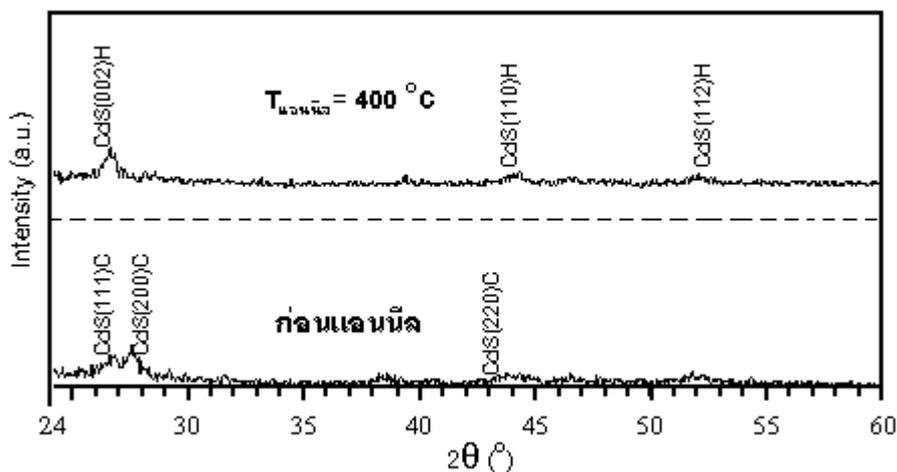
ตารางที่ 3 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนัล 300 °C

ฟิล์ม CdS/CdTe	Cubic		Hexagonal		
	a (Å)	a (Å)	c (Å)	c/a	D ( nm )
ก่อนแอนนัล	5.76				15.35
หลังแอนนัล		4.15	6.64	1.598	20.15

จากตารางที่ 2 ฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า ก่อนแอนนัล ฟิล์ม CdS มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ มีพีคเกิดขึ้นจากระนาบ (111), (220) และ ระนาบ (311) ซึ่งตรงกับมุม 2θ เท่ากับ 26.68 °, 43.89 ° และ 51.88 ° ตามลำดับ และหลังจากนำฟิล์มไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่า มีพีคเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากระนาบ (002), (101) และ (112) ซึ่งตรงกับมุม 2θ เท่ากับ 26.59 °, 28.42 ° และ 51.92 ° ตามลำดับ ซึ่งเป็นการแสดงโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะ โกนอล ในขณะที่เดียวกันพบว่า โครงสร้างผลึกของแผ่นรองรับ CdTe มีการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นแบบเฮกซะ โกนอล เช่นกัน และ จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนเพิ่มขึ้นหลังจากมีการแอนนัล โดยที่ก่อนแอนนัลมีขนาดเกรน 15.35 nm และ หลังจากแอนนัล มีขนาดเกรน 20.15 nm และมีอัตราส่วนของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล  $c/a = 1.598$

## 2.2 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนิตที่อุณหภูมิ 400 °C ในอากาศ เวลาการแอนนิต 60 นาที

### 2.2.1 ผลการศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ก่อนแอนนิต และ หลังการแอนนิต



ภาพที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนิต และหลังจากแอนนิตในอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้เวลา 60 นาที

จากกราฟสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีก่อนแอนนิตและหลังแอนนิตได้ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $2\theta$  กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนิต 400 °C

ก่อนแอนนิต		หลังแอนนิต	
$2\theta$ (°)	(hkl)	$2\theta$ (°)	(hkl)
26.58	CdS(111)C	26.61	CdS(002)H,(111)C
27.52	CdTe(200)C	29.23	CdTe(102)H
43.93	CdS(220)C	44.16	CdS(110)H
		51.95	CdS(112)H

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ CdS ที่เป็นแบบลูกบาศก์ และ แบบ เฮกซะ โกนอล ซ้อนกันอยู่ สามารถหาค่าต่าง ๆ ของ โครงสร้าง ได้ดังนี้

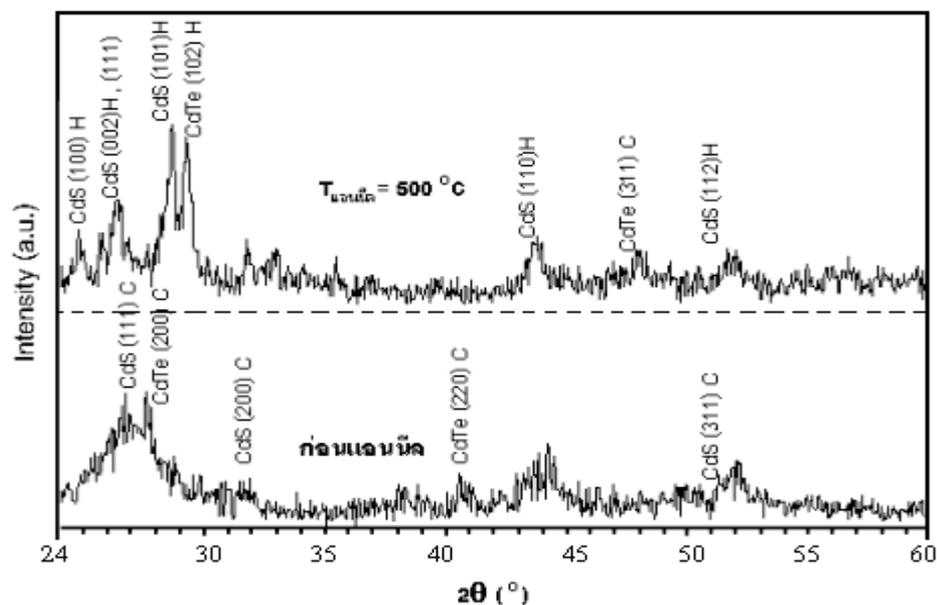
ตารางที่ 5 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนัล 400 °C

ฟิล์ม CdS/CdTe	Cubic		Hexagonal		
	a (Å)	a (Å)	c (Å)	c/a	D ( nm )
ก่อนแอนนัล	5.803				16.23
หลังแอนนัล		4.12	6.59	1.600	21.68

จากตารางที่ 4 ฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C เมื่อทำการศึกษาโดยเทคนิค การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า ก่อนแอนนัล ฟิล์ม CdS มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ โดยมีพีคเกิดขึ้นที่ระนาบ (111) และ (220) ซึ่งตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $26.58^\circ$  และ  $43.93^\circ$  ตามลำดับ และหลังจากนำฟิล์ม ไปแอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400 °C พบว่า มีพีคเกิดขึ้นเพิ่มเติมที่ระนาบ (002),(110) และ (112) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะ โกนอล ในขณะที่เดียวกัน พบว่า โครงสร้างผลึกของแผ่นรองรับ CdTe มีการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ เป็นแบบเฮกซะ โกนอล เช่นกัน และ จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าขนาดของเกรน มีขนาดเพิ่มขึ้น หลังจากมีการแอนนัล โดยที่ก่อนแอนนัลมีขนาดเกรน 16.23 nm และ หลังแอนนัลมีขนาดเกรน 21.68 nm และจากการคำนวณค่าคงตัวแลตทิซ ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลหลังจากการแอนนัล พบว่า มีค่าอัตราส่วน  $c/a = 1.600$

## 2.3 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนิตที่อุณหภูมิ 500 °C ในอากาศ เวลาการแอนนิต 60 นาที

### 2.3.1 ผลการศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ก่อนแอนนิตและหลังการแอนนิต



ภาพที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบผลลวดลายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนิต และ หลังจากแอนนิตในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา 60 นาที

จากกราฟสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีก่อนแอนนิตและหลังแอนนิตได้ดังนี้

ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม  $2\theta$  กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนิต 500 °C

ก่อนแอนนิต		หลังแอนนิต	
$2\theta$ (°)	(hkl)	$2\theta$ (°)	(hkl)
26.68	CdS(111)C	24.85	CdS(100)H
27.58	CdTe(220)C	26.38	CdS(002)H , (111)C
31.74	CdS(200)C	28.66	CdS(101)H
40.67	CdTe(220)C	29.24	CdTe(102)H
51.94	CdS(311)C	31.82	CdS(220)C

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ CdS ที่เป็นแบบลูกบาศก์ และ แบบ เฮกซะ โกนอล ซ้อนกันอยู่ สามารถหาค่าต่าง ๆ ของ โครงสร้าง ได้ดังนี้

ตารางที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนัล 500 °C

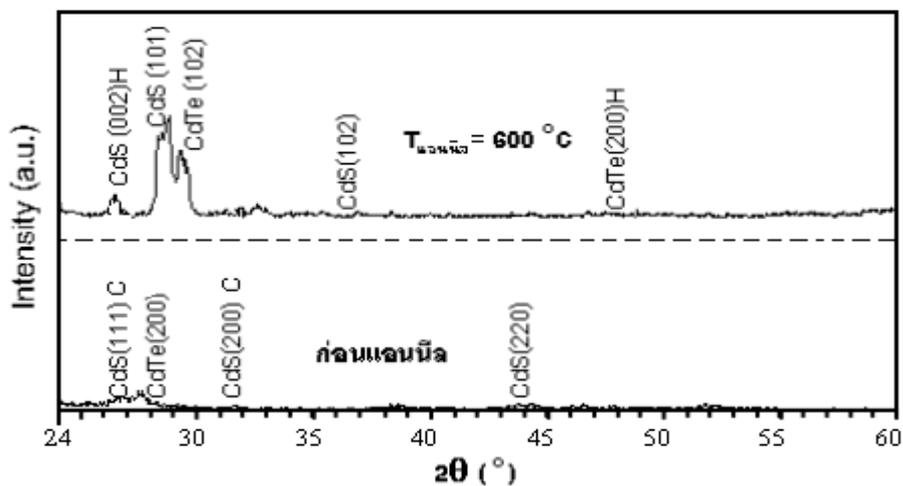
ฟิล์ม CdS/CdTe	Cubic		Hexagonal		
	a (Å)	a (Å)	c (Å)	c/a	D ( nm )
ก่อนแอนนัล	5.78	-	-	-	16.48
หลังแอนนัล	5.85	4.047	6.751	1.667	30.06

จากตารางที่ 6 ฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ก่อนแอนนัล CdS มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ คือมีพีคเกิดขึ้นจากระนาบ (111), (200), และ (311) ซึ่งตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $26.68^\circ$ ,  $31.74^\circ$  และ  $51.94^\circ$  ตามลำดับ และผลการเลี้ยวเบนของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลแล้ว พบว่า ชั้นของ CdS มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลอย่างชัดเจน คือมีพีคเกิดขึ้นที่ระนาบ (100), (002), (101) ซึ่งตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $24.85^\circ$ ,  $26.38^\circ$  และ  $28.66^\circ$  ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพบว่า โครงสร้างผลึกของแผ่นรองรับ CdTe มีการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นแบบเฮกซะ โกนอล เช่นกัน และ จากตารางที่ 7 พบขนาดเกรนของ CdS หลังจากแอนนัลเพิ่มขึ้นจากเดิมคือ ก่อนแอนนัลมีขนาดเกรน 16.48 nm และ หลังแอนนัล มีขนาดเกรน 30.06 nm และ

$$c/a = 1.667$$

2.4 फिल्म CdS/CdTe แอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C ในอากาศ เวลาการแอนนีส 60 นาที

2.4.1 ผลการศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ก่อนแอนนีสและหลังการแอนนีส



ภาพที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีส และ หลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้เวลา 60 นาที

จากกราฟสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีก่อนแอนนีสและหลังแอนนีสได้ดังนี้

ตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม  $2\theta$  กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ อุณหภูมิ การแอนนีส 600 °C

ก่อนแอนนีส		หลังแอนนีส	
$2\theta$ (°)	(hkl)	$2\theta$ (°)	(hkl)
26.58	CdS(111)C	26.52	CdS(002)H,(111)C
27.52	CdTe(200)C	28.78	CdS(101)H
31.61	CdS(200)C	29.26	CdTe(102)H
43.93	CdS(220)C	36.91	CdS(102)H
		48.93	CdTe(200)H

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ CdS ที่เป็นแบบลูกบาศก์ และ แบบ เฮกซะ โกนอล ซ้อนกันอยู่ สามารถหาค่าต่าง ๆ ของ โครงสร้าง ได้ดังนี้

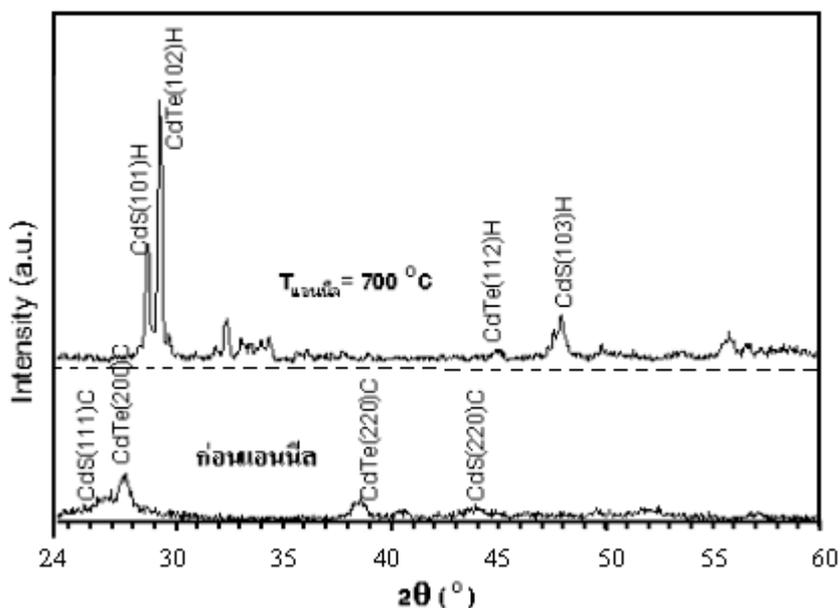
ตารางที่ 9 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนัล 600 °C

ฟิล์ม CdS/CdTe	Cubic		Hexagonal		D ( nm )
	a (Å)	a (Å)	c (Å)	c/a	
ก่อนแอนนัล	5.80	-	-	-	16.42
หลังแอนนัล		4.123	6.717	1.629	43.99

จากตารางที่ 8 ฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 600 °C เมื่อทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ก่อนแอนนัล CdS มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ คือมีพีคเกิดขึ้นจากระนาบ (111) ,(200) และ (220) ซึ่งตรงกับมุม 2θ เท่ากับ 26.58°, 31.61° และ 43.93° ตามลำดับ และผลการเลี้ยวเบนของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลแล้ว พบว่า ชั้นของ CdS มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล คือมีพีคเกิดขึ้นที่ระนาบ (002), (101),(102) ซึ่งตรงกับมุม 2θ เท่ากับ 26.52°, 28.78° และ 36.91°ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพบว่า โครงสร้างผลึกของแผ่นรองรับ CdTe มีการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นแบบเฮกซะ โกนอล เช่นกัน และ จากตารางที่ 9 พบว่าขนาดเกรนของ CdS หลังจากแอนนัลเพิ่มขึ้นจากเดิมคือ ก่อนแอนนัลมีขนาดเกรน 16.42 nm และ หลังแอนนัล มีขนาดเกรน 43.99 nm และ คำนวณค่าคงตัวแลตทิซของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลหลังแอนนัล จะได้อัตราส่วน  $c/a = 1.629$

## 2.5 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนัลที่อุณหภูมิ 700 °C ในอากาศ เวลาการแอนนัล 60 นาที

### 2.5.1 ผลการศึกษาด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ก่อนแอนนัลและหลังการแอนนัล



ภาพที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์ม CdS/CdTe ก่อน แอนนีส และ หลังจากแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้เวลา 60 นาที

จากกราฟสามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีก่อนแอนนีส และหลังแอนนีสได้ดังนี้

ตารางที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม  $2\theta$  กับ ระนาบ (hkl) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ อุณหภูมิการแอนนีส 700 °C

ก่อนแอนนีส		หลังแอนนีส	
$2\theta$ (°)	(hkl)	$2\theta$ (°)	(hkl)
26.26	CdS(111)C	28.65	CdS(101)H
27.54	CdTe(200)C	29.24	CdTe(102)H
38.43	CdTe(220)C	45.01	CdTe(112)H
43.83	CdS(220)C	47.89	CdS(103)H

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ CdS ที่เป็นแบบลูกบาศก์ และ แบบ เอ็กซะ โกนอล ซ้อนกันอยู่ สามารถหาค่าต่าง ๆ ของโครงสร้างได้ดังนี้

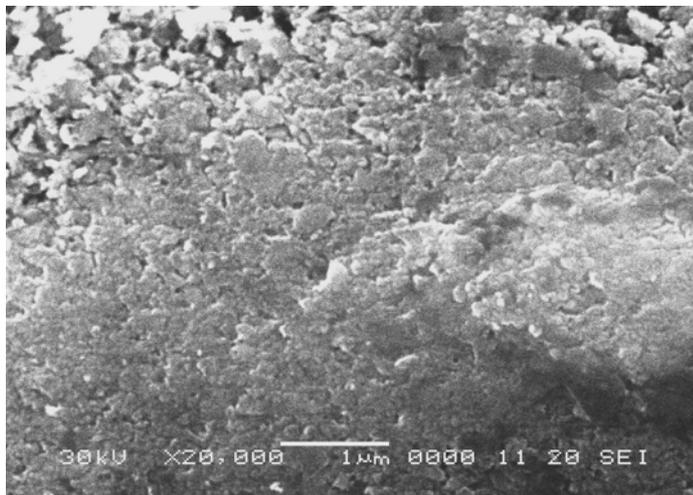
ตารางที่ 11 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกของฟิล์ม CdS/CdTe แบบคิวบิก และ เฮกซะ โกนอล ที่อุณหภูมิการแอนนัล 700 °C

ฟิล์ม CdS/CdTe	Cubic		Hexagonal		
	a (Å)	a (Å)	c (Å)	c/a	D ( nm )
ก่อนแอนนัล	5.87	-	-	-	16.69
หลังแอนนัล	-	4.074	6.609	1.623	50.98

จากตารางที่ 10 ฟิล์ม CdS/cdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 700 °C เมื่อทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ก่อนแอนนัล CdS มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ คือมีพีคเกิดขึ้นจากระนาบ (111) และ (220) ซึ่งตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $26.26^\circ$  และ  $43.83^\circ$  ตามลำดับ และผลการเลี้ยวเบนของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลแล้ว พบว่า ชั้นของ CdS มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล คือมีพีคเกิดขึ้นที่ระนาบ (101),(103) ซึ่งตรงกับมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $28.65^\circ$  และ  $47.89^\circ$  ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพบว่า โครงสร้างผลึกของแผ่นรองรับ CdTe มีการเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เป็นแบบเฮกซะ โกนอล เช่นกัน และ จากตารางที่ 11 พบว่าขนาดเกรนของ CdS หลังจากแอนนัลเพิ่มขึ้นจากเดิมคือ ก่อนแอนนัลมีขนาดเกรน 16.69 nm และ หลังแอนนัล มีขนาดเกรน 50.98 nm และ คำนวณค่าคงตัวแลตทิซของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลหลังแอนนัล จะได้อัตราส่วน  $c/a = 1.623$

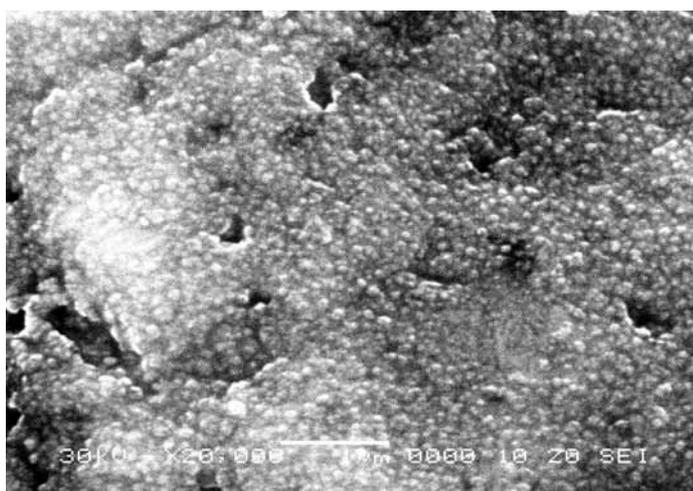
### 3. ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.1 ฟิล์ม CdS/CdTe ไม่แอนนัล



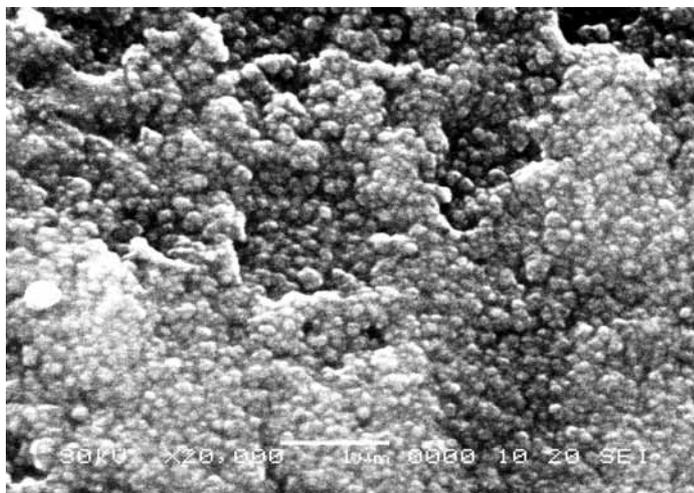
ภาพที่ 26 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อไม่มีการแอนนัล  
ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

#### 3.2 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C



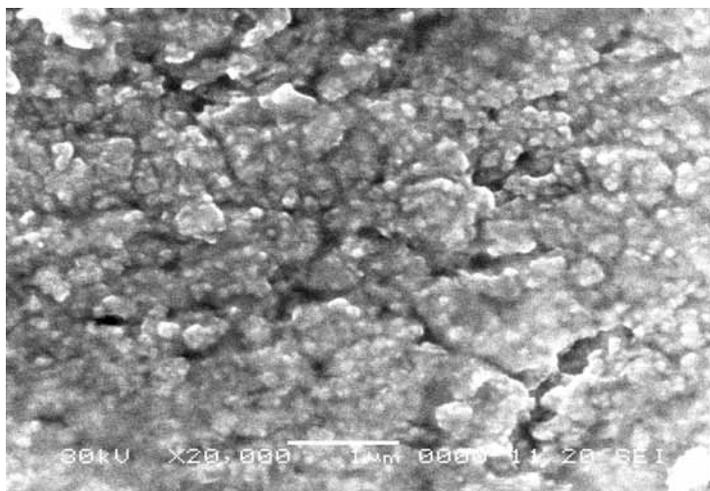
ภาพที่ 27 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 °C  
ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

### 3.3 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนีสที่อุณหภูมิ 400 °C



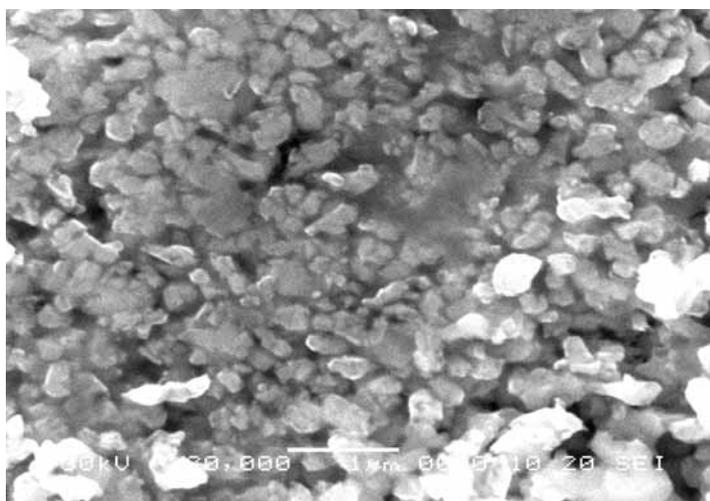
ภาพที่ 28 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

### 3.4 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนีสที่อุณหภูมิ 500 °C



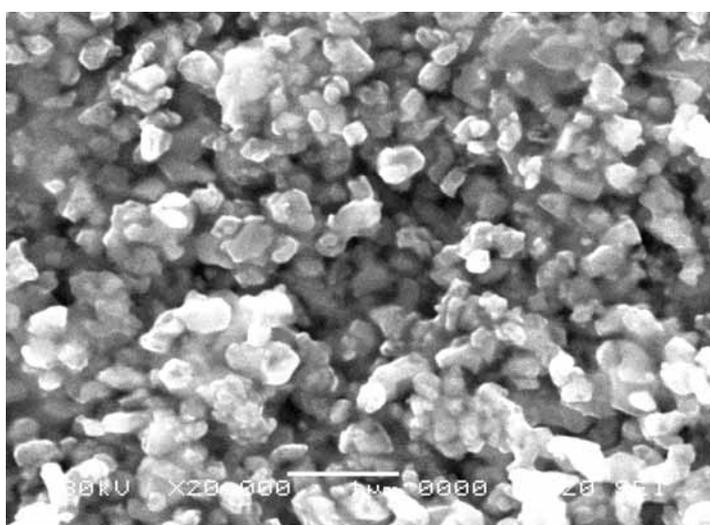
ภาพที่ 29 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

### 3.5 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนิตที่อุณหภูมิ 600 °C



ภาพที่ 30 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนิตที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

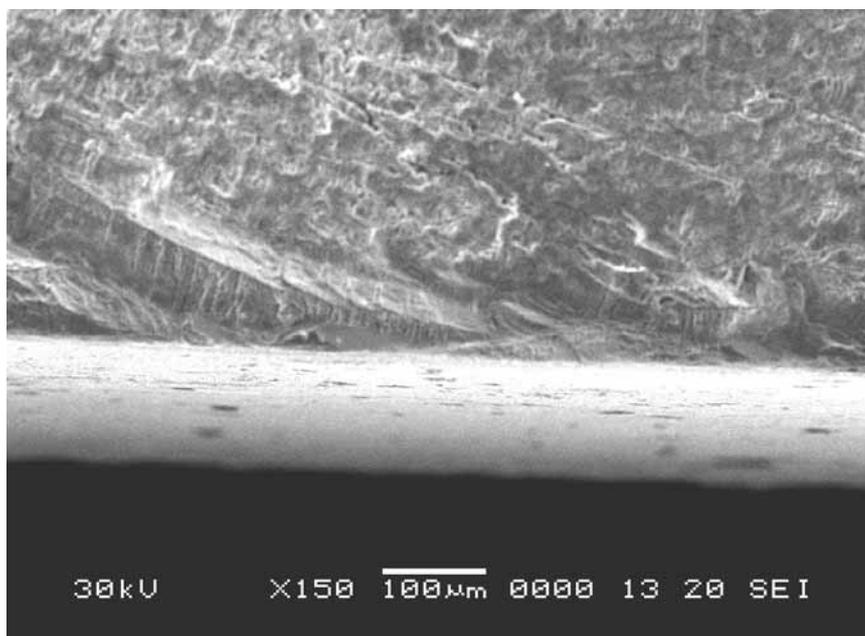
### 3.6 ฟิล์ม CdS/CdTe แอนนิตที่อุณหภูมิ 700 °C



ภาพที่ 31 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อมีการแอนนิตที่อุณหภูมิ 700 °C ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า

จากภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 31 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นได้ว่าขนาดเกรนของฟิล์ม CdS/CdTe มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีการแอนนिलที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น และจากภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่า เกรน มีขนาดเล็กมาก หลังจากมีการแอนนिलที่อุณหภูมิ 300 °C จะเห็นได้ว่าขนาดเกรนมีความชัดเจนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น และ สังเกตเห็นว่าฟิล์มมีช่องว่างซึ่ง แสดงถึงความพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก จากสเกลของภาพพบว่าขนาดเกรนมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และ ฟิล์มที่แอนนिलที่อุณหภูมิ 400 °C จะมีลักษณะไม่แตกต่างจากฟิล์มที่แอนนिलที่อุณหภูมิ 300 °C มากนัก และฟิล์มที่แอนนिलที่อุณหภูมิ 500 °C จะเห็นได้ว่าเกรนมีการแบ่งเป็นเกรนที่มีขอบเขตเกรนชัดเจนมากขึ้น และมีขนาดใหญ่มากขึ้น และ ฟิล์มที่แอนนिलที่อุณหภูมิ 600 °C จะเห็นได้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีลักษณะเป็นเหลี่ยมทำมุมประมาณ 60 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล สำหรับ ฟิล์มที่แอนนिलที่อุณหภูมิ 700 °C เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลมากขึ้น

### 3.7 ภาดตัดขวางของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ไม่แอนนिल



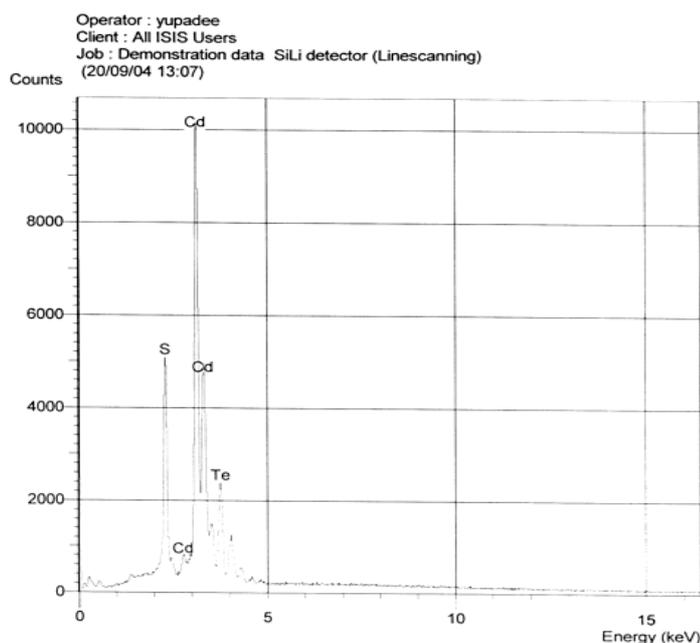
ภาพที่ 32 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์ม CdS/CdTe เมื่อไม่มีการแอนนिल ใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กำลังขยาย 150 เท่า

จากภาพที่ 32 ซึ่งแสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะที่ฟิล์มยังไม่มีการแอนนिल ส่วนบนแสดงชั้นของผลึก CdTe และ ส่วนที่มีสีขาวตรงกลางแสดงชั้นของฟิล์ม CdS

ซึ่งจากการคำนวณด้วยสเกลจากภาพ พบว่าชั้นของฟิล์ม CdS มีความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นฟิล์มประเภทฟิล์มหนา (thick film)

#### 4. ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS

การใช้เทคนิค EDS สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบของวัสดุสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์ม CdS บน CdTe ที่เตรียมได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ดังแสดงใน ภาพที่ 33 และ ตารางที่ 11 จากการศึกษาสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของอะตอมของต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์ม CdS ที่เคลือบบน ฟิล์ม CdTe เชิงคุณภาพพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ประกอบด้วยอะตอมของธาตุเหล่านี้คือ Cd, S และ Te จึงเป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มที่เตรียมได้เป็นฟิล์ม CdS จริงนอกจากนี้พบว่ายังมีอะตอมของธาตุอื่น คือ Te ปะปนอยู่ในผลการวิเคราะห์ด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากอะตอมของธาตุ Te เป็นองค์ประกอบของแผ่นรองรับ CdTe



ภาพที่ 33 แสดงสเปกตรัมของพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของอะตอมของแต่ละธาตุ ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์ม CdS ที่เคลือบบนฟิล์ม CdTe

เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์ม CdS ที่เตรียมบน CdTe ขณะที่ยังไม่มีการแอนนีกัล พบว่ามีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 12

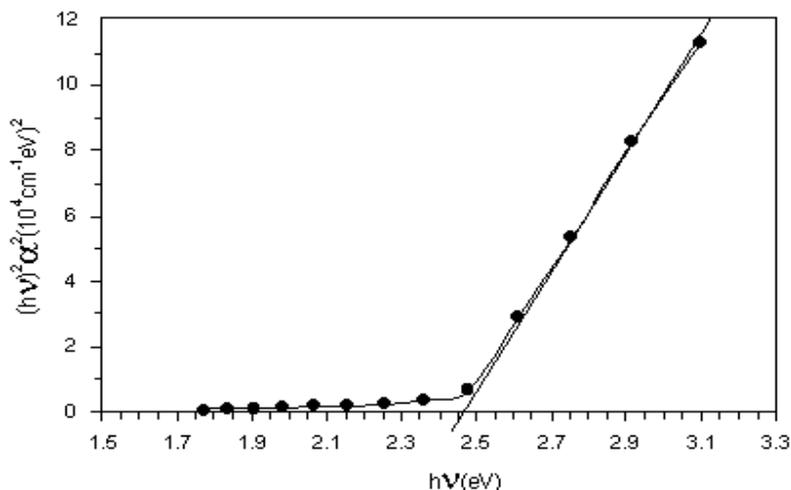
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDS

ธาตุ	Cd	S	Te
เปอร์เซ็นต์ของอะตอมธาตุ	55.33 %	27.52 %	17.11 %

จากตารางที่ 12 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุแคดเมียม ต่อเปอร์เซ็นต์อะตอมของธาตุซัลเฟอร์ มีอัตราส่วนประมาณ 2 : 1 ซึ่งตามทฤษฎีจากสูตรของสารประกอบ CdS อัตราส่วนน่าจะเป็น 1 : 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก อิเล็กตรอนที่ยิงลงไปในพื้นที่ฟิล์ม CdS/CdTe ทะลุผ่านชั้นของฟิล์ม CdS ลงไปถึง ชั้นแผ่นรองรับ CdTe ทำให้ไปกระตุ้นอะตอมของธาตุแคดเมียมที่อยู่ในชั้นของแผ่นรองรับแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วย ดังนั้นเปอร์เซ็นต์อะตอมของแคดเมียมที่ได้จึงมีค่ามากกว่าทฤษฎี และ จากพิก ในภาพที่ 33 อาจกล่าวได้ว่า พิกที่ 1 และ พิกที่ 2 เป็นพิกที่มาจากชั้นของ CdS ส่วนพิกที่ 3 และ พิกที่ 4 เป็นพิกที่มาจากชั้นของ CdTe เพราะ พิกที่ 1 และ พิกที่ 2 มีความเด่นชัดมากกว่า เนื่องจากมาจากชั้นของ CdS ซึ่งอยู่ด้านบน

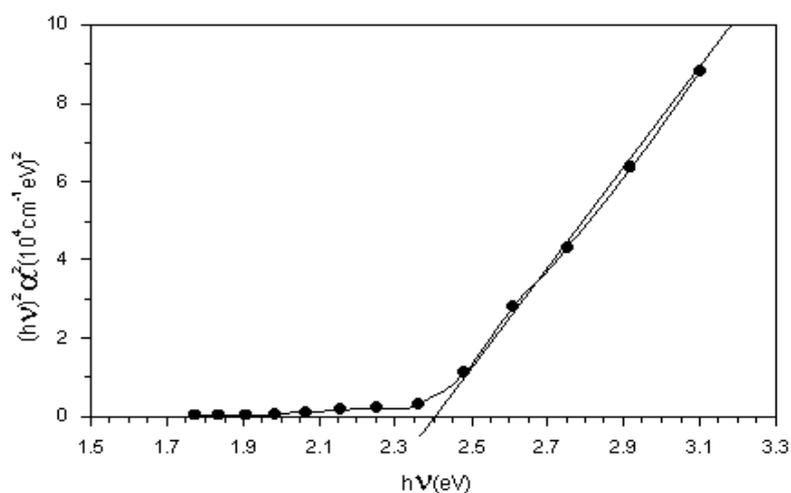
## 5. ผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/CdTe

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ไม่มีการแอนนีกัล และการหาช่องว่างแถบพลังงาน



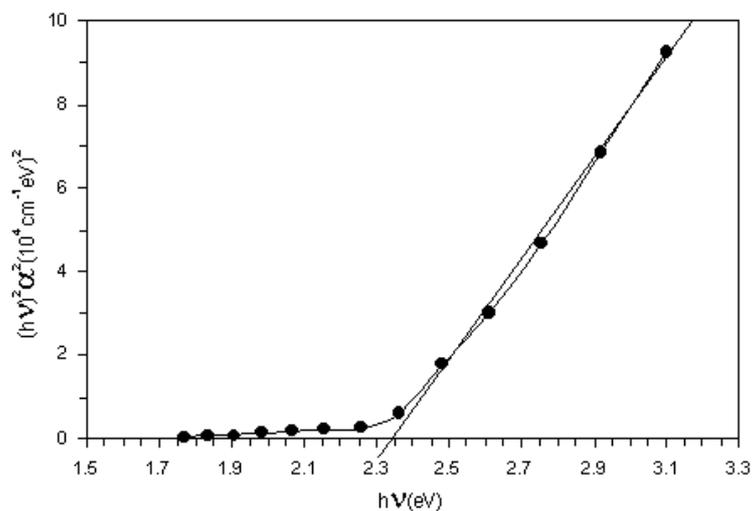
ภาพที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่ไม่มีการแอนนีกัล

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนีกัลที่อุณหภูมิ 300 °C และการหาช่องว่างแถบพลังงาน



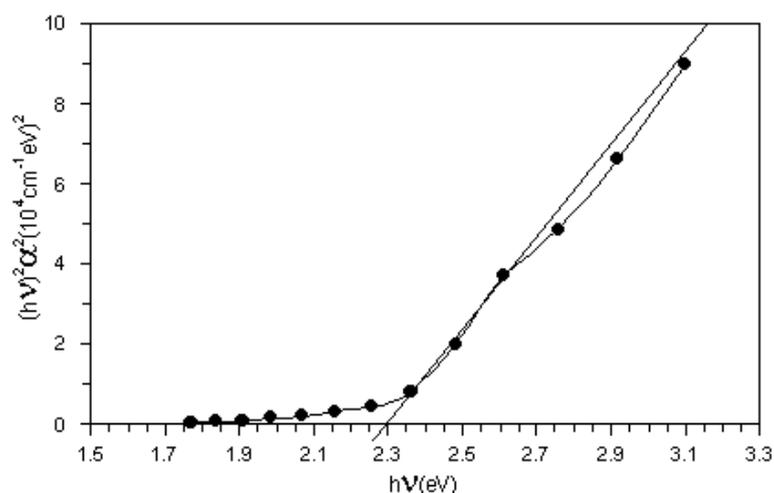
ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล 300 °C

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนีกที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ การหาช่องว่างแถบพลังงาน



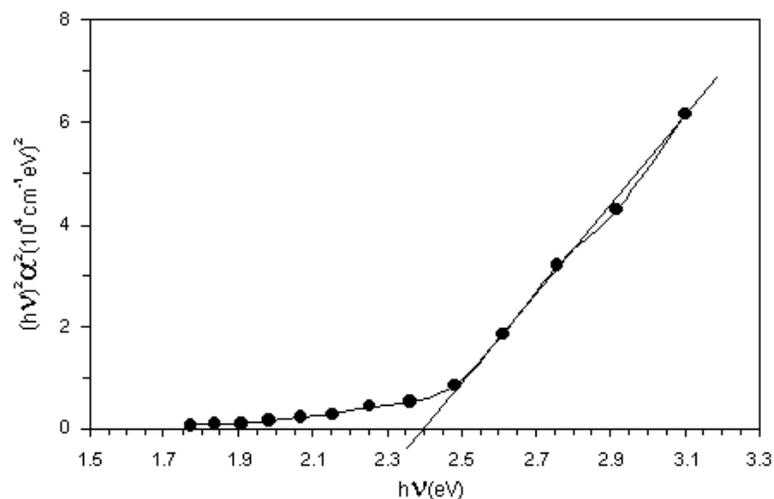
ภาพที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีก  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนีกที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ การหาช่องว่างแถบพลังงาน



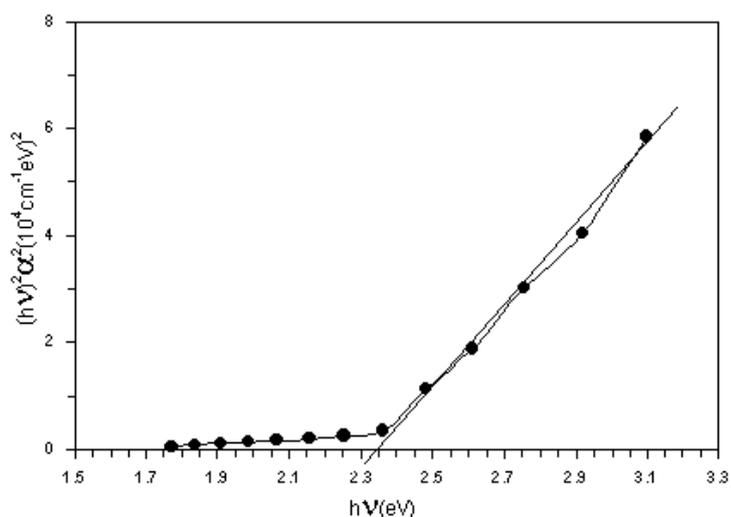
ภาพที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีก  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนีกัล ที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ การหาช่องว่างแถบพลังงาน



ภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนีกัล ที่อุณหภูมิ  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ การหาช่องว่างแถบพลังงาน



ภาพที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน  $h\nu$  กับ  $(h\nu)^2(\alpha)^2$  ของฟิล์ม CdS/CdTe อุณหภูมิการแอนนีกัล  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากภาพที่ 34 ถึง ภาพที่ 39 สามารถสรุปค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdS/CdTe ที่แอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิการแอนนัลและช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdS/CdTe

อุณหภูมิการแอนนัล ( $^{\circ}\text{C}$ )	ช่องว่างแถบพลังงาน ; $E_g$ (eV)
ไม่แอนนัล	2.45
300	2.40
400	2.35
500	2.30
600	2.40
700	2.35

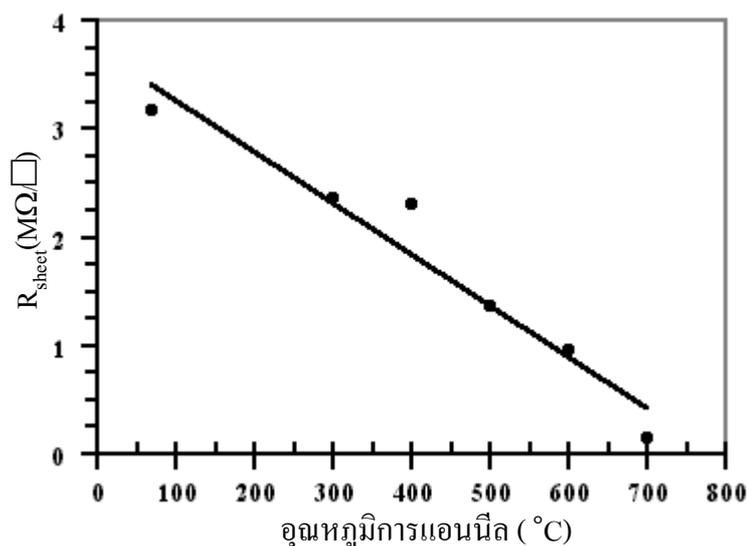
จากตารางที่ 13 แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม CdS/CdTe ที่ไม่มีการแอนนัล มีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่า ฟิล์ม CdS/CdTe ที่ได้ทำการแอนนัล แต่เมื่อพิจารณาแต่ละช่วงอุณหภูมิการแอนนัลพบว่า ช่วงอุณหภูมิการแอนนัล  $300^{\circ}\text{C}$  ถึง  $500^{\circ}\text{C}$  ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง จาก 2.45 eV เป็น 2.30 eV แต่ที่อุณหภูมิการแอนนัล  $600^{\circ}\text{C}$  ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.40 eV และที่อุณหภูมิการแอนนัล  $700^{\circ}\text{C}$  ช่องว่างแถบพลังงานลดลงมาเป็น 2.35 eV การลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานดังที่กล่าวมา อาจเกิดจาก การเกิด เอ็กซิตอน (exciton) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงแต่ยังไม่ขึ้นไปอยู่ในแถบการนำเพราะถูก ยึดเหนี่ยวโดยโฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ซึ่งทำให้เกิดแถบพลังงานอยู่ระหว่างแถบเวเลนซ์ และแถบการนำ ดังนั้นเพื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงจะทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวสามารถขึ้นไปอยู่ในแถบการนำได้ดีขึ้น นั่นคือเหมือนมีการลดค่าช่องว่างแถบพลังงานจริง ๆ ลงนั่นเอง ทำให้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นยาว หรือ มีพลังงานโฟตอนน้อย อิเล็กตรอนก็สามารถข้ามไปยังแถบการนำได้

## 6. ผลการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe

ตารางที่ 14 ผลการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์ม CdS/CdTe

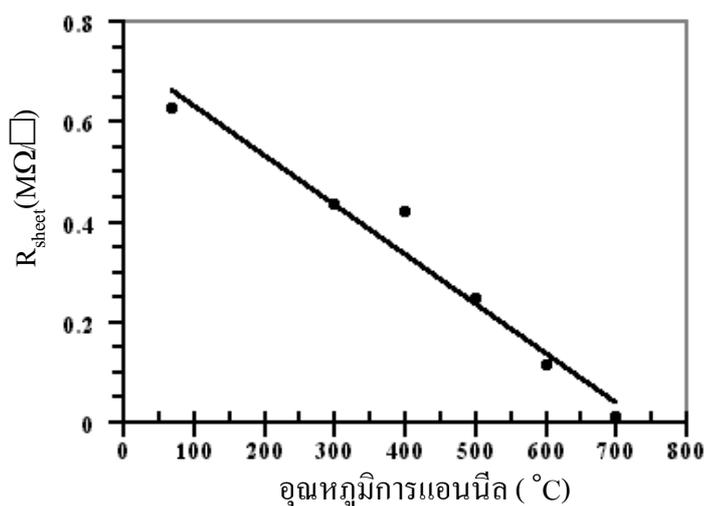
อุณหภูมิการแอนนีสล (°C)	$R_{\text{sheet}}$ ขณะไม่ฉายแสง ( $M\Omega/\square$ )	$R_{\text{sheet}}$ ขณะฉายแสง ( $M\Omega/\square$ )	ความไวแสง
ไม่แอนนีสล	3.1785	0.6268	4.0709
300	2.3636	0.4356	4.4260
400	2.3031	0.4218	4.4605
500	1.3697	0.2468	4.5498
600	0.9521	0.1156	7.2361
700	0.1523	0.01003	14.1844

จากตารางที่ 14 จะเห็นได้ว่า สำหรับฟิล์มที่มีการแอนนีสลที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ความต้านทานแผ่นขณะไม่ฉายแสง มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงได้ดังกราฟดังต่อไปนี้



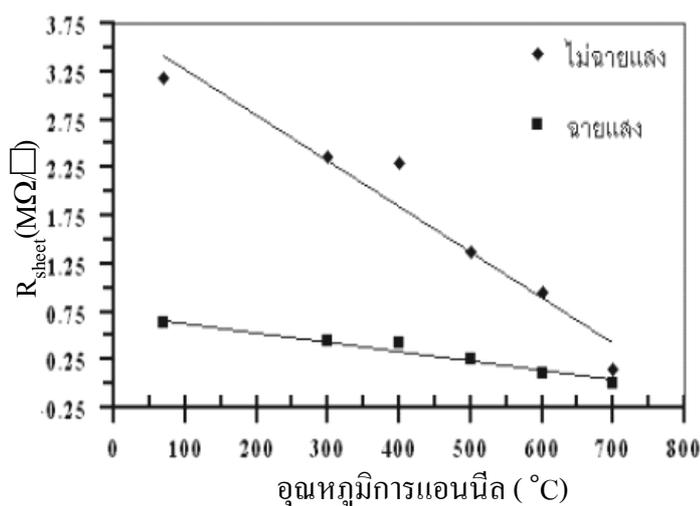
ภาพที่ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{\text{sheet}}$ ) กับอุณหภูมิการแอนนีสล ขณะไม่ฉายแสง ของฟิล์ม CdS/CdTe

จากตารางที่ 14 จะเห็นได้ว่า สำหรับฟิล์มที่มีการแอนนีกที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ความต้านทานแผ่นขณะฉายแสง มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉายแสง แต่ค่าของความต้านทานจะมีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ฉายแสง ซึ่งแสดงได้ดังกราฟดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{sheet}$ ) กับอุณหภูมิการแอนนีกขณะฉายแสง ของฟิล์ม CdS/CdTe

และเมื่อนำกราฟระหว่างความต้านทานแผ่นขณะฉายแสงกับความต้านทานแผ่นขณะไม่ฉายแสง มาเปรียบเทียบกัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น ( $R_{sheet}$ ) ขณะที่ไม่ฉายแสง และขณะที่ฉายแสง กับ อุณหภูมิการแอนนีกของฟิล์ม CdS/CdTe

นำข้อมูลจากตารางที่ 14 มาคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะไม่ฉายแสง และ ขณะฉายแสง

อุณหภูมิการแอนนีสล (°C)	สภาพต้านทานไฟฟ้า ขณะไม่ฉายแสง ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	สภาพต้านทานไฟฟ้า ขณะฉายแสง ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )
ไม่แอนนีสล	$1.152 \times 10^5$	$0.227 \times 10^5$
300	$0.856 \times 10^5$	$0.157 \times 10^5$
400	$0.834 \times 10^5$	$0.152 \times 10^5$
500	$0.496 \times 10^5$	$0.089 \times 10^5$
600	$0.345 \times 10^5$	$0.041 \times 10^5$
700	$0.055 \times 10^5$	$0.003 \times 10^5$

เมื่อเปรียบเทียบความต้านทานแผ่นของฟิล์ม CdS บน CdTe ขณะที่ไม่ฉายแสงและขณะมีการฉายแสง พบว่า ความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงอย่างชัดเจน (ประมาณ  $10^6 \Omega/\square$ ) ขณะที่มีการฉายแสง และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของการแอนนีสลกับความต้านทานแผ่น พบว่า ความต้านทานแผ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสลสูงขึ้น และ เมื่อนำค่าความต้านทานที่ได้ไปหาสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี แวน เดอ พาว พบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าขณะฉายแสงมีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ฉายแสงเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสลเดียวกัน และ ทั้งกรณีฉายแสงและไม่ฉายแสงพบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิการแอนนีสลที่เพิ่มขึ้นทั้งสองกรณี ทั้งนี้อาจมีผลมาจากการแพร่ของอะตอม Te จากชั้นแผ่นรองรับ CdTe มายังชั้นฟิล์ม CdS จึงทำให้ชั้น CdS มีพาหะในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานลดลงหรือนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นนั่นเอง และ ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 700 °C พบว่ามีความไวแสงมากที่สุดซึ่งอาจมีผลมาจากชั้น CdS มีความหนาลดลง ทำให้แสงตกกระทบที่ชั้น CdTe ได้มากขึ้น และ CdTe เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติการตอบสนองแสงที่ดี จึงทำให้มีความไวแสงมากที่สุด ณ ที่อุณหภูมิการแอนนีสล 700 °C

## สรุป

1. फिल्म CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ที่ผลิตขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยวิธีการออบเคลือบสารเคมีนี้ เป็นฟิล์มที่ผลิตได้ด้วยอุปกรณ์ที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับการเตรียมฟิล์มโดยวิธีอื่นๆ และ พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีผิวหน้าของฟิล์มเรียบ สม่ำเสมอ มีความมันวาว และ ยึดติดกับแผ่นรองรับ CdTe ได้ดี
2. สมบัติของโครงสร้างเชิงจุลภาคหลังจากนำฟิล์มที่ได้ไปแอนนีสที่อุณหภูมิต่าง ๆ เปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้แอนนีส พบว่า ก่อนแอนนีสผลึกของฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ และฟิล์มที่แอนนีสแล้วจะมีโครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล และเมื่อทำการคำนวณหาขนาดเกรนของผลึก CdS หลังจากแอนนีส โดยใช้สูตรของเชอเรอร์ พบว่าขนาดเกรน แปรผันตรงกับ อุณหภูมิการแอนนีสที่เพิ่มขึ้น
3. สมบัติของโครงสร้างเชิงมหภาค ซึ่งศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดของเกรนมีค่าใกล้เคียงการคำนวณโดยใช้สูตรของเชอเรอร์ คือ มีค่าประมาณ 16 nm จากภาพถ่ายที่ได้จาก SEM พบว่า ฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe ก่อน แอนนีส มีลักษณะของเม็ดผลึกค่อนข้างกลม ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ และหลังจากมีการแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าเม็ดผลึกมีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยมซึ่งเป็นลักษณะของ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล และ ยังพบว่าขนาดของเม็ดผลึกมีค่าแปรผันตรง กับ อุณหภูมิการแอนนีสที่เพิ่มขึ้นและเมื่อทำการวิเคราะห์ผิวหน้าของฟิล์มเชิงคุณภาพพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุ แคดเมียม และ ซัลเฟอร์ เป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มที่เตรียมได้เป็นฟิล์ม ของแคดเมียมซัลไฟด์จริง
4. สมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS ที่ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง สเปกโตรมิเตอร์ และ นำค่าที่ได้ไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdS พบว่า ฟิล์มก่อนแอนนีส มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.45 eV และ เมื่อนำฟิล์ม CdS ที่แอนนีสแล้ว มาคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน หลังการแอนนีสมีค่าน้อยกว่า ก่อนแอนนีส เช่น ฟิล์มที่แอนนีสอุณหภูมิ 500 °C มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.30 eV ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถข้ามขึ้นไปยังแถบการนำได้ดีขึ้น กว่าฟิล์ม CdS ที่ไม่ได้ทำการแอนนีส

5. สมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์ม CdS บนแผ่นรองรับ CdTe พบว่า ฟิล์มที่ไม่แอนนีสมีความต้านทานแผ่นขณะไม่ฉายแสงประมาณ  $3.1785 \text{ M}\Omega/\square$  และ เมื่อนำฟิล์มที่แอนนีสแล้วมาทำการศึกษา พบว่า ความต้านแผ่นมีแนวโน้มลดลง เช่น ฟิล์มที่แอนนีสที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  มีค่าความต้านทานแผ่นประมาณ  $0.1523 \text{ M}\Omega/\square$  และเมื่อทำการทดลองขณะฉายแสง พบว่า ความต้านทานแผ่นของฟิล์มมีค่าลดลงจากกรณีไม่ฉายแสงประมาณ  $10^6 \Omega/\square$  ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเรื่องความไวแสงของฟิล์ม พบว่า ความไวแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการแอนนีส อาจเกิดจากเมื่อมีการให้ความร้อน ทำให้อะตอมของธาตุ Te ที่ชั้นของแผ่นรองรับ CdTe แพร่ขึ้นมายังชั้นฟิล์ม CdS ที่อยู่ด้านบน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการแอนนีส  $700^\circ\text{C}$  มีความไวแสงมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากชั้นของฟิล์ม CdS มีความเบาบางลง (สังเกตได้จากภาพถ่ายของฟิล์ม) ทำให้ปรากฏชั้นของแผ่นรองรับ CdTe ชัดเจนมากขึ้น และ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำ CdTe มีความไวต่อแสงสูง ทำให้ฟิล์ม CdS/CdTe มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

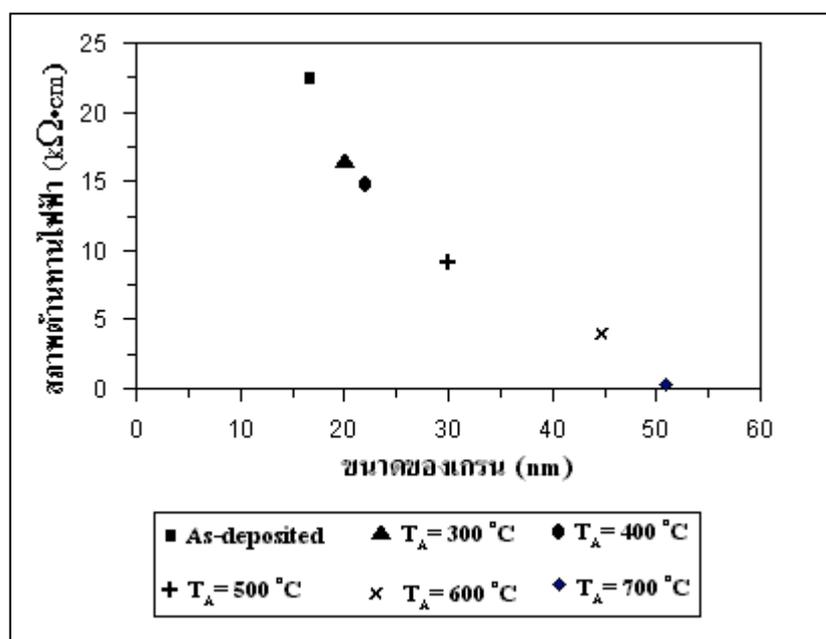
## 6. สรุปความสัมพันธ์จากการศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe

### 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการศึกษาคูณสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe

เมื่อนำผลจากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มาคำนวณขนาดของเกรน เปรียบเทียบกับขนาดเกรนที่พิจารณาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีลักษณะตรงกัน กล่าวคือ ฟิล์ม CdS/CdTe ก่อนแอนนีสมีเกรนขนาดเล็ก และมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะของเกรนมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และหลังจากนำฟิล์มไปแอนนีสในอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า มีลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลและมีเกรนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายผิวหนังที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีเกรนบางเกรนที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมทำมุมประมาณ  $60^\circ$  ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล และ ขนาดของเกรนก็มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกด้วย

## 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค และ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค กับ ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์ม CdS/CdTe

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของเกรน กับ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS พบว่ามีลักษณะแปรผกผันกัน คือ ขณะที่อุณหภูมิของการแอนนัลเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าฟิล์ม CdS ที่มีเกรนขนาดใหญ่ มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าฟิล์ม CdS ที่มีเกรนขนาดเล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรน กับ สภาพต้านทานไฟฟ้า(ขณะฉายแสง) ของฟิล์ม CdS/CdTe ที่อุณหภูมิการแอนนัลเดียวกัน

## 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและมหภาค กับ ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน CdS/CdTe

เมื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนกับช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdS พบว่ามีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะตรงข้ามกัน กล่าวคือ ก่อนแอนนัล เกรนมีขนาดเล็ก และหลังจากการแอนนัล เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าลดลง หลังจากมีการแอนนัล การที่ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงนี้ทำให้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงหรือพลังงานไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์สามารถข้ามไปยังแถบการนำได้ดีมากขึ้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าว

แสดงว่า ฟิล์ม CdS ที่มีเกรนขนาดใหญ่จะมีขนาดช่องว่างพลังงานแคบกว่าฟิล์ม CdS ที่มีเกรนขนาดเล็ก

#### 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe

เมื่อเปรียบเทียบค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ สภาพต้านทานไฟฟ้า พบว่า มีค่าเปลี่ยนไปในลักษณะสอดคล้องกัน คือ ก่อนแอนนีก ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากกว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงานหลังจากการแอนนีก ซึ่งสอดคล้องกับค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า กล่าวคือ หลังจากการแอนนีกแล้ว สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็น การแอนนีกมีผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานแคบลง ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนส์สามารถข้ามไปยังแถบการนำได้ดีขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยพลังงานแสง หรือ พลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น หรือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง จากความสัมพันธ์ของสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe สามารถสรุปเป็นตารางรวมได้ดังนี้

ตารางที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านต่าง ๆ ของฟิล์ม CdS/CdTe กับอุณหภูมิการแอนนีก

$T_A$ (°C)	Grain size (nm)	$E_g$ (eV)	Dark resistivity (k $\Omega$ .cm)	Photo resistivity (k $\Omega$ .cm)	Photosensitive
As-deposited	16.23	2.45	115.2	22.7	4.07
300	20.15	2.40	85.6	15.7	4.42
400	21.68	2.35	83.4	15.2	4.46
500	30.06	2.30	49.6	8.9	4.54
600	43.99	2.40	34.5	4.1	7.20
700	50.98	2.35	5.5	0.3	14.18

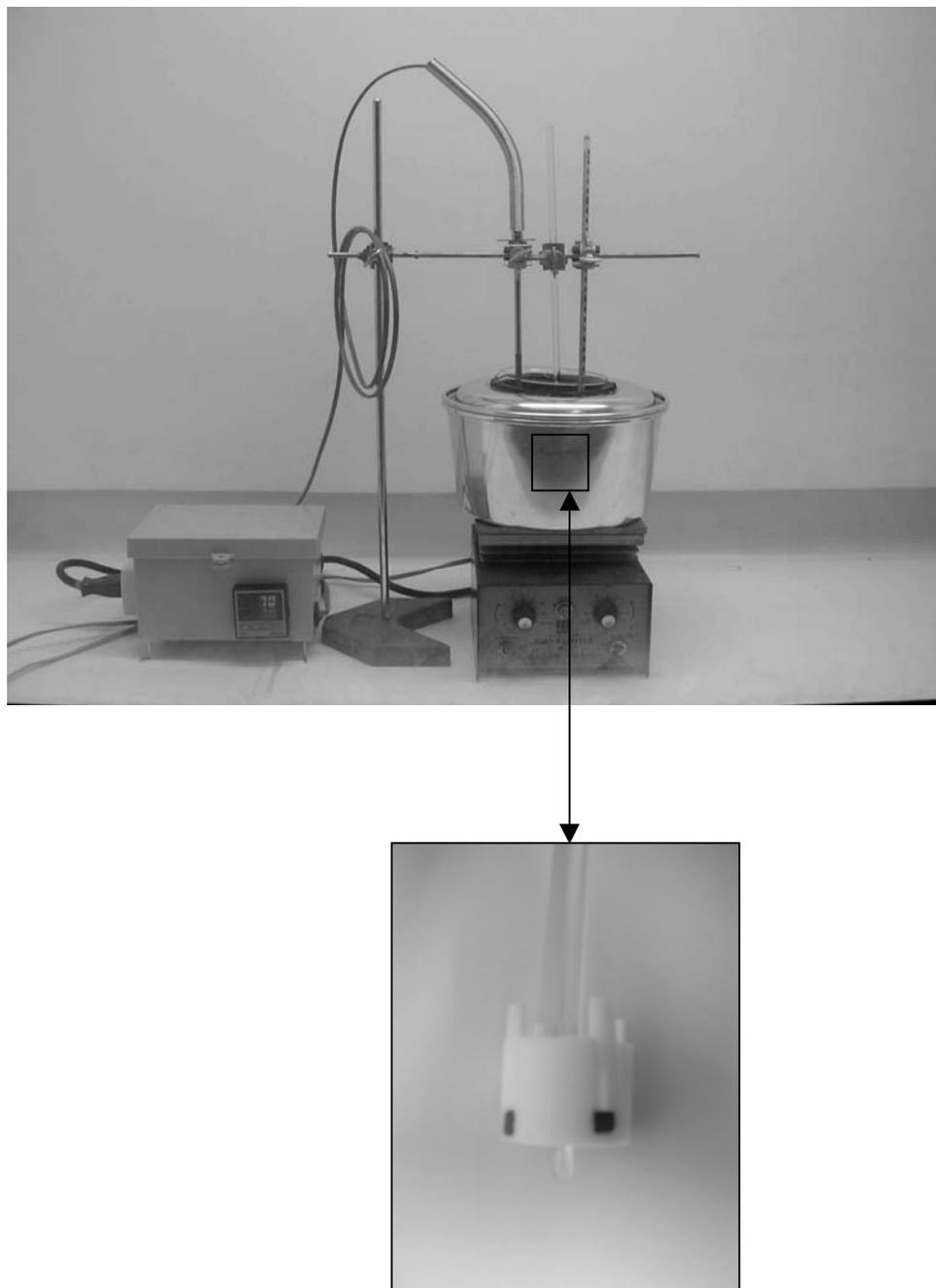
## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรกฎ วัฒนวิเชียร. 2540. โพลีคริสเตอิลิเล็กทรอนิกส์. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- จารุทัศน์ เตชะวิจิตร, สาวิตรี เปรมรัตน์วงศ์ และ หัสพร ทองแดง. 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์. โครงการพิเศษ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปัญญา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., กรุงเทพฯ.
- ไปรมา ดิษฐสมบุรณ์. 2543. กระบวนการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการออบเคลือบสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภกิจ มณีอินทร์. 2543. การพอกพูนและการกำหนดลักษณะเฉพาะของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่เจือด้วยไนโตรเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิงหนเดช แดงจวง. 2539. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการออบเคลือบสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Batzner, D.L., R. Wendt, A. Romro, H. Zogg and A.N. Tiwari. 2000. A study of the back contacts on CdTe/CdS solar cells. **Thin Solid Films**. 40: 463-467.
- Culity, B.D. 1956. **Elements of X-ray Diffraction**. Addison-Wesly Publishing Company Inc., Massachusetts.
- Hiroshi, U., S. Hajimu and I. Seiji. 1997. Screen printed CdS/CdTe cells for visible light radiation sensor. **Measurement Science and Technology**. 8: 86-91.

- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lefdil, S.A. and C. Messaoudi. 1998. Temperature growth and annealing effects on CdS thin films prepared by chemical bath deposition process. **Phys. Stat. Sol.** 168: 417-423.
- Patidar, D., R. Sharma, N. Jain, T. P. Sharma and N.S. Saxena. 2006. Optical properties of CdS Sintered film. **Bull. Mter. Sci.** 29: 21-24.
- Ridley, B.K. 1999. **Quantum Proceses in semiconductor**. Thomson Press Ltd., New Delhi.
- Sharma, R.K., K. Jain and A.C. Rastogi. 2003. Growth of CdS and CdTe thin films for the fabrication of n-CdS/p-CdTe solar cell. **Current Applied Physics.** 3: 199-204.
- Touskova, J., D. Kindl, L. Dobiasova and J. Tousek. 1998. Influence of growth and microstructure of CdS/CdTe solar cells. **Solar Energy Materials and solar cells.** 53: 177-188.

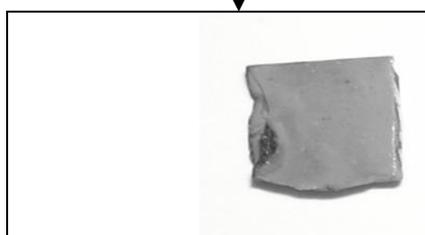
ภาคผนวก

1. อุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี (CBD)



ภาพผนวกที่ 1 แสดงอุปกรณ์ในการเตรียมฟิล์ม CdS/CdTe โดยวิธีการอาบเคลือบสารเคมี (CBD)

2. แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงจุลภาคของฟิล์ม CdS/CdTe โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Phillips รุ่น PW-3020 ใช้  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) ที่ ความต่างศักย์ 30 kV และ กระแส 25 mA



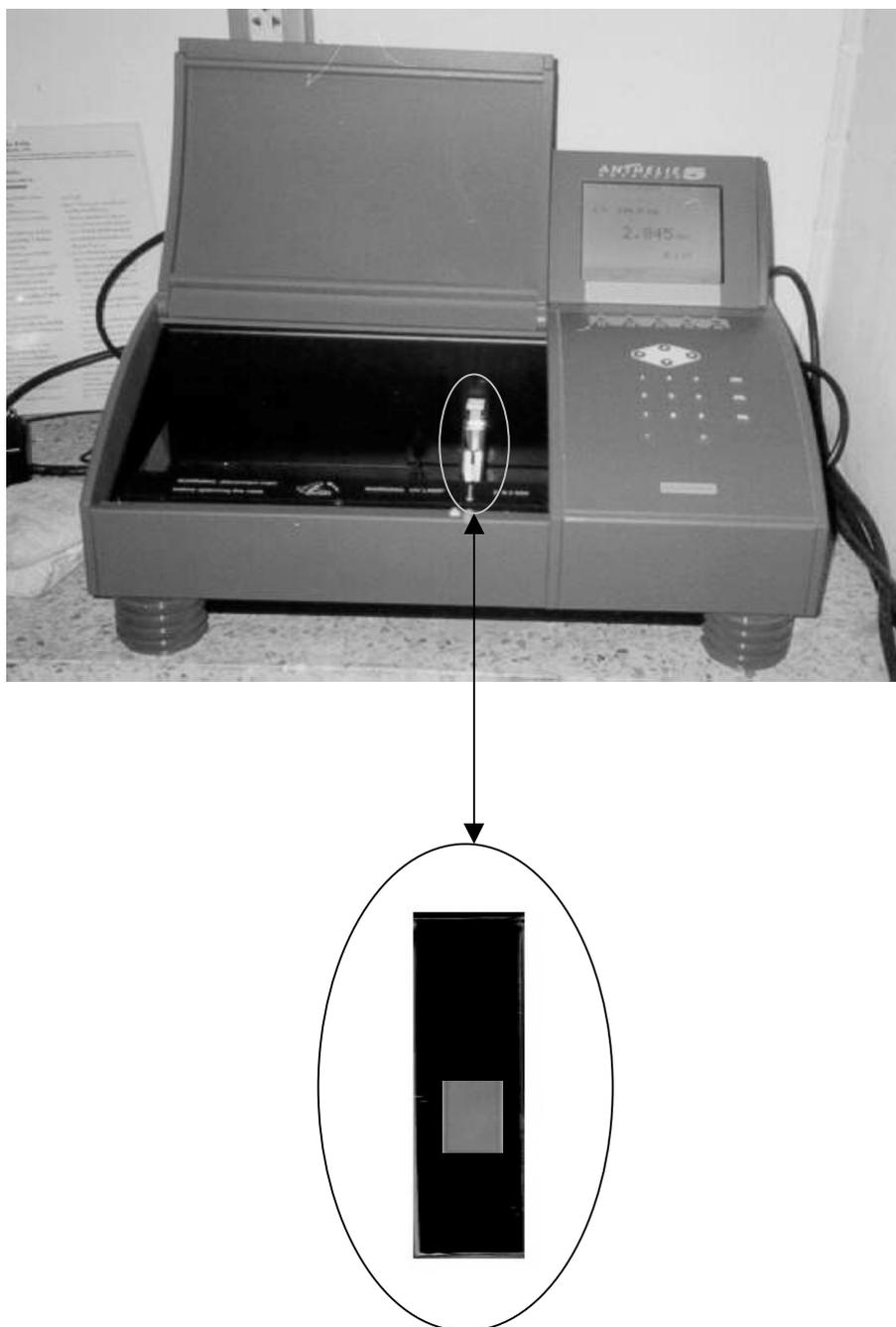
ภาพผนวกที่ 2 แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงจุลภาคของฟิล์ม CdS/CdTe โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

3. แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงมหภาคของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JOEL รุ่น JSM-5600 LV ใช้ความต่างศักย์ 30 kV กำลังขยาย 20,000 เท่า



ภาพผนวกที่ 3 แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงมหภาคของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยเครื่อง สเปกโตรมิเตอร์  
ยี่ห้อ Secomam รุ่น Anthelie Advanced 5 UV-VIS ใช้ความยาวคลื่นแสง 300 – 900 nm



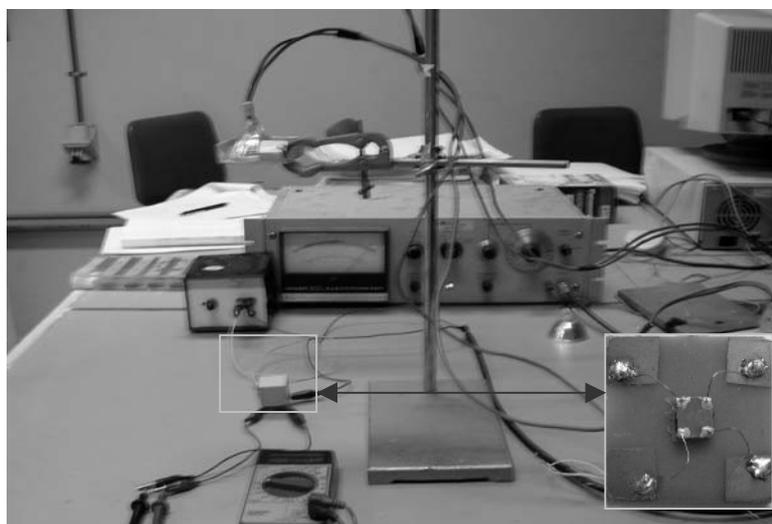
ภาพผนวกที่ 4 แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม CdS/CdTe ด้วยเครื่อง  
สเปกโตรมิเตอร์

## 5. แสดงอุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe

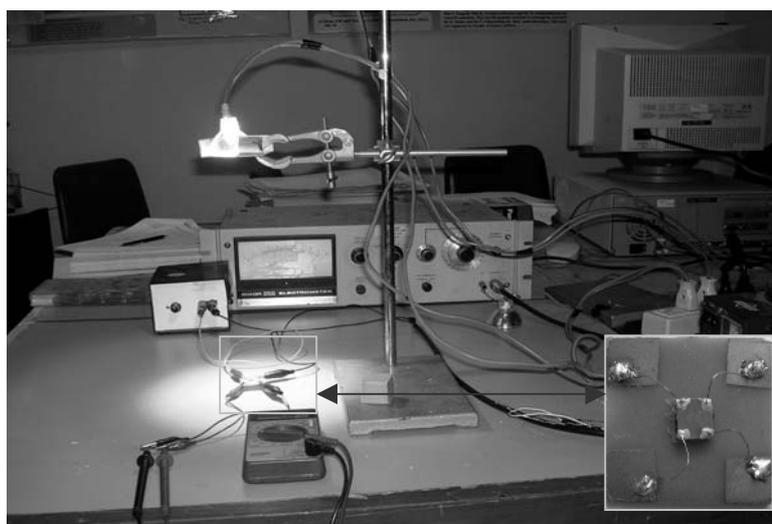
### 5.1 อุปกรณ์

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟ 30 โวลต์
3. มัลติมิเตอร์
4. หลอดฮาโลเจน 300 วัตต์
5. กาวเงินนำไฟฟ้า (conduction silver paint )

### 5.2 การจัดอุปกรณ์ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 5 แสดงการจัดอุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะไม่ฉายแสง



ภาพผนวกที่ 6 แสดงการจัดอุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม CdS/CdTe ขณะฉายแสง

## 6. บัตรไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก CdS

80-0019		Wavelength= 1.54060				
CdS		2 $\theta$	Int	h	k	l
Cadmium Sulfide		26.547	999*	1	1	1
		30.748	216	2	0	0
		44.040	467	2	2	0
		52.163	332	3	1	1
		54.671	45	2	2	2
		64.043	58	4	0	0
		70.594	104	3	3	1
		72.715	44	4	2	0
		80.993	95	4	2	2
		87.070	64	5	1	1
Rad.: CuK $\alpha$ 1	$\lambda$ : 1.54060	Filter:	d-sp: Calculated			
Cut off: 17.7	Int.: Calculated	I/ICor.: 14.06				
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)						
Ref: Yeh, C et al., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 10086 (1992)						
Sys.: Cubic	S.G.: F43m (216)					
a: 5.811	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 4.890	Dm:	ICSD #: 067789				
Peak height intensity, R-factor: 0.000, S Zn type, PSC: cF8.						
Mwt: 144.47, Volume[CD]: 196.22.						

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

80-0019	Quality: C	Cd S
CAS Number:		Cadmium Sulfide
Molecular Weight: 144.47		Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)
Volume[CD]: 196.22		Ref: Yeh, C et al., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 10086 (1992)
Dx: 4.890	Dm:	
Sys: Cubic		
Lattice: Face-centered		
S.G.: F43m (216)		
Cell Parameters:		
a 5.811 b c		
$\alpha$ $\beta$ $\gamma$		
I/ICor: 14.06		
Rad: CuK $\alpha$ 1		
Lambda: 1.54060		
Filter:		
d-sp: calculated		
ICSD #: 067789		

2 $\theta$	Int-v	h	k	l	2 $\theta$	Int-v	h	k	l	2 $\theta$	Int-v	h	k	l
26.547	100	1	1	1	54.671	9	2	2	2	80.993	27	4	2	2
30.748	25	2	0	0	64.043	13	4	0	0	87.070	19	5	1	1
44.040	76	2	2	0	70.594	26	3	3	1					
52.163	64	3	1	1	72.715	11	4	2	0					

80-0006		Wavelength= 1.54060				
CdS		2 $\theta$	Int	h	k	l
Cadmium Sulfide		24.929	631	1	0	0
		26.660	449	0	0	2
		28.328	999*	1	0	1
		36.821	253	1	0	2
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.54060 Filter:		43.905	420	1	1	0
d-sp: Calculated		48.117	406	1	0	3
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/lor.: 7.94		51.148	62	2	0	0
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)		52.108	305	1	1	2
Ref: Yeh, C et al., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 10086 (1992)		53.077	133	2	0	1
		54.919	20	0	0	4
Sys.: Hexagonal S.G.: P6 $3$ mc (186)		58.601	49	2	0	2
a: 4.121 b: c: 6.682 A: C: 1.6215		61.212	20	1	0	4
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 2 mp:		67.164	115	2	0	3
Ref: Ibid.		69.647	75	2	1	0
		71.263	85	2	1	1
		72.829	40	1	1	4
		75.975	91	1	0	5
		75.975	2	1	2	
Dx: 4.882 Dm: ICSD #: 067776		78.343	8	2	0	4
		80.709	43	3	0	0
		83.766	101	2	1	3
Peak height intensity, R-factor: 0.000, S Zn type, PSC: hP4.		86.840	44	3	0	2
Mwt: 144.47, Volume[CD]: 98.27.		87.526	7	0	0	6



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

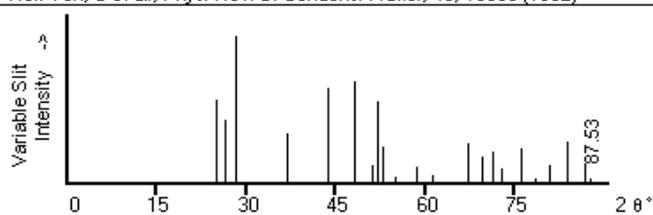
80-0006 Quality: C  
CAS Number:  
Molecular Weight: 144.47  
Volume[CD]: 98.27  
Dx: 4.882 Dm:  
Sys: Hexagonal  
Lattice: Primitive  
S.G.: P6 $3$ mc (186)  
Cell Parameters:  
a 4.121 b c 6.682  
 $\alpha$   $\beta$   $\gamma$   
I/lor: 7.94  
Rad: CuK $\alpha$ 1  
Lambda: 1.54060  
Filter:  
d-sp: calculated  
ICSD #: 067776

CdS

Cadmium Sulfide

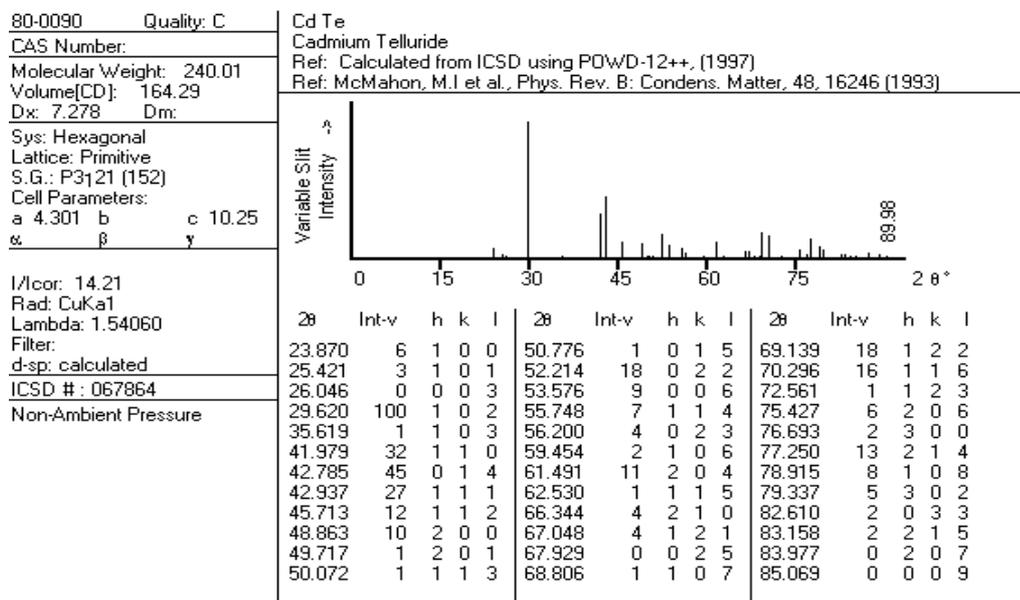
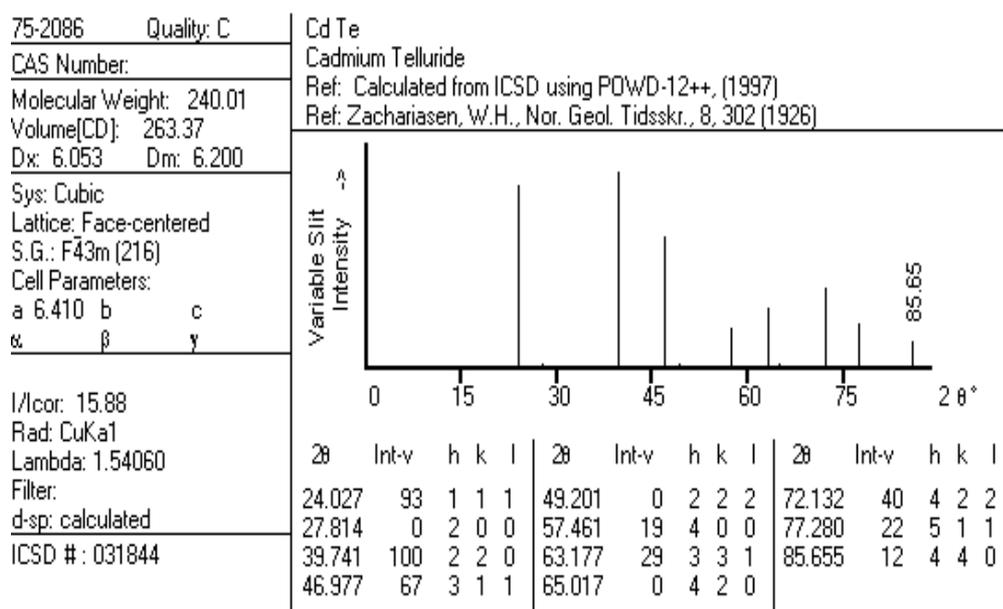
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)

Ref: Yeh, C et al., Phys. Rev. B: Condens. Matter, 46, 10086 (1992)

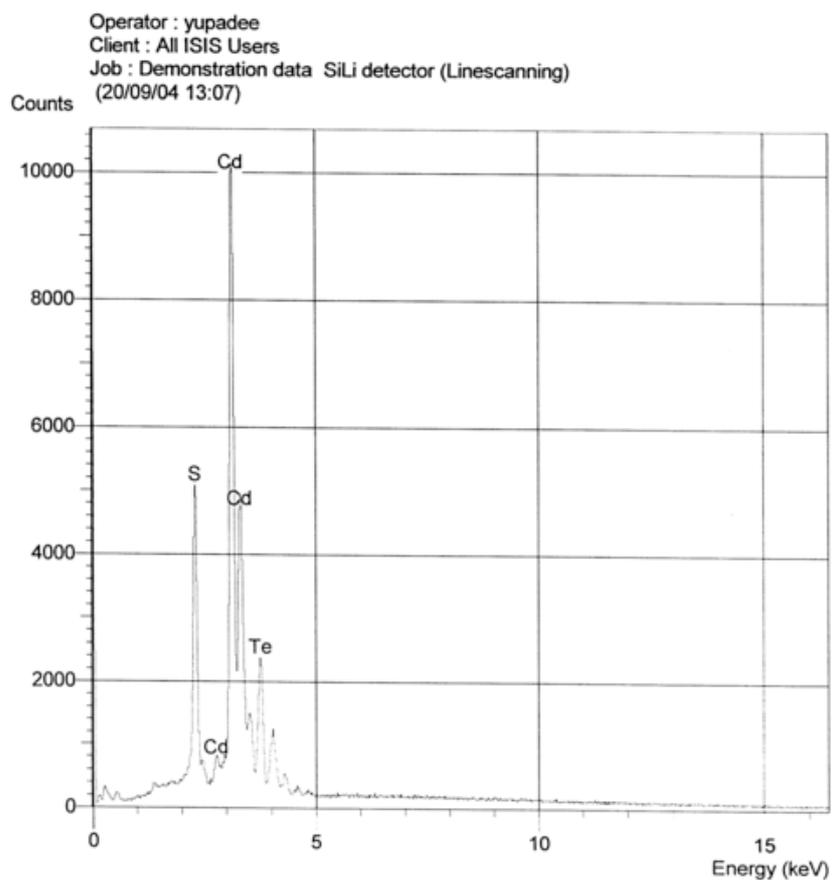


2 $\theta$	Int-v	h	k	l	2 $\theta$	Int-v	h	k	l	2 $\theta$	Int-v	h	k	l
24.929	56	1	0	0	53.077	24	2	0	1	75.975	23	1	0	5
26.660	42	0	0	2	54.919	4	0	0	4	75.975	23	2	1	2
28.328	100	1	0	1	58.601	10	2	0	2	78.343	2	2	0	4
36.821	33	1	0	2	61.212	4	1	0	4	80.709	11	3	0	0
43.905	64	1	1	0	67.164	26	2	0	3	83.766	28	2	1	3
48.117	68	1	0	3	69.647	18	2	1	0	86.840	12	3	0	2
51.148	11	2	0	0	71.263	20	2	1	1	87.526	2	0	0	6
52.108	55	1	1	2	72.829	10	1	1	4					

## 7. บัตรโฟลต์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึก CdTe



## 8. ข้อมูลสมบรูณ์จาก EDS ของฟิล์ม CdS/CdTe



SEMQuant results. Listed at 13:17:24 on 20/09/04  
Operator: yupadee  
Client: All ISIS Users  
Job: Demonstration data SiLi detector (Linescanning)  
Spectrum label:

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
Analysed all elements and normalised results.

5 peaks possibly omitted: 0.00, 0.28, 0.54,  
1.42, 1.76 keV

Standards :

S K FeS2 01/12/93  
Cd L Cd 01/12/93  
Te L HgTe 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
S K	ED	9.50	27.52
Cd L	ED	66.95	55.33
Te L	ED	23.56	17.15
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

- ชื่อ – สกุล : นายนิคม อุ่นใจ
- วัน เดือน ปีเกิด : 24 มกราคม พ.ศ. 2519
- สถานที่เกิด : บ้าน โศกลำม ตำบลหนองบัว อำเภอพยัคฆภูมิพิสัย  
จังหวัดมหาสารคาม
- การศึกษา : ระดับปริญญาตรี (สาขาฟิสิกส์ โครงการครูทายาท รุ่นที่ 2)  
สถาบันราชภัฏมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
- การทำงาน : ปัจจุบัน รับราชการครู อันดับ คศ. 1 โรงเรียนพยัคฆภูมิวิทยาคาร  
อำเภอพยัคฆภูมิพิสัย จังหวัดมหาสารคาม
- ทุนการศึกษา : ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับปริญญาโท – เอก จากบัณฑิตวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีการศึกษา 2547