

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์



รฟ.

ธ 568ก

นางสาวธิดิมา นาครินทร์

เลขหมู่ 0539

เลขทะเบียน

วันเดือนปี

6.12552823

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation and Some Properties of Cadmium Sulphide



**A Special project Submitted in Partial Fulfillment of
the Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์
โดย นางสาวธิดิมา นาครินทร์
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา 1. ผศ. ดร. รุติณัย แก้วแดง
2. ผศ. งามนิตย์ แก้วแดง
3. ดร. ชัยสิงห์ ภูรกิจเกียรติ
4. ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(รองศาสตราจารย์ สุรพล รักวิชัย)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการ โครงการพิเศษ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุติณัย แก้วแดง)

ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

กรรมการ

.....
(ดร. ชัยสิงห์ ภูรกิจเกียรติ)

กรรมการ

.....
(ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation and Some Properties of Cadmium Sulphide
Name Miss Dhitima Nakarin
Special Project Advisor Asst.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang
Asst.Prof. Ngamnit Gaewdang
Dr. Chisingh Poo-Rakkiat
Dr. Tiparatana Wongcharoen
Department Applied Physics
Academic Year 1996

Abstract

Single crystal of cadmium sulphide were grown from vapor phase by the physical vapor deposition technique (PVD) in argon atmosphere at 1000- 1150⁰ C . The starting material was 99.999% purity CdS powder with wurtzite structure. The as-grown ingots with brown color up to 10 mm in size were obtained. The lattice parameters determined on crushed crystals with internal standard using X-ray diffraction technique were found to be wurtzite structure with $a = 4.162(4)\text{\AA}$ and $c = 6.684(5)\text{\AA}$.

The films of CdS prepared on slide glass by thermal evaporation technique in vacuum from the synthesized bulk materials. X-ray diffraction patterns performed on these thin films showed only the characteristic peaks of the cubic phase. The contact of metallic indium on n-CdS bulk crystals and on thin films gave good ohmic contact conditions after annealing at 500⁰ C for 1 hour in argon atmosphere. The electrical resistivity of CdS bulk crystals in dark , under illuminated intensity 3 W/m² and under 50 W/m² were $2.2 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$, 170 $\Omega\text{-cm}$ and 6.5 $\Omega\text{-cm}$ respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษในครั้งนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิษฐ์ แก้วแดง ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ และ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่คอยให้คำแนะนำรวมทั้งเอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ อีกทั้งทุนทรัพย์ที่เป็นค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ใช้เครื่องบีบปิดสุญญากาศที่ความดันต่ำ และขอขอบคุณ อ. ประเสริฐ พิมขาวขำ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพปฎล สุทธิศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุญาตให้ใช้ เครื่อง X-ray diffractometer ในการศึกษาโครงสร้างของโครงสร้างผลึก

ขอขอบคุณ ท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่มีความอนุเคราะห์ ให้ใช้ระบบสุญญากาศในการเตรียมฟิล์มบาง และ อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟที่ให้กระแสสูง รวมทั้ง ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ที่ท่านอาจารย์มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ รวมทั้งพนักงานที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ สจล. ที่ให้ยืมเครื่องมือต่าง ๆ และ ขอขอบคุณ คุณตุลา จันคนา ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการต้องงจรในการควบคุมอุณหภูมิของเตา รวมทั้งเพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่มีส่วนในการช่วยเหลือให้งานดำเนินไปด้วยดี

ที่ขาดเสียมิได้ ขอขอบคุณ คุณอัมพวรรณ บัวบุตร และ คุณ ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี เพื่อนร่วมโครงการเดียวกัน ที่มีส่วนช่วยทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และ คุณแม่ ที่คอยเป็นห่วง และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 โครงสร้างผลึก	
2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	3
2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	4
2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์.....	5
2.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	5
2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากอะตอมในผลึก.....	6
2.4.2 สถานะการเลี้ยวเบนสำหรับเซลล์ 1 หน่วยของผลึก.....	7
บทที่ 3 การปลูกผลึก	
3.1 เทคนิคการปลูกผลึกสถานะไอ.....	9
3.2 ทฤษฎีการปลูกผลึกสถานะไอ.....	15
3.2.1 อุณหพลศาสตร์ของ CdS.....	16
3.2.2 การไหลของแก๊ส.....	17
3.2.3 จลนพลศาสตร์ของการปลูกผลึก.....	18
บทที่ 4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	
4.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน.....	23
4.2 จุดสัมผัสโอห์มมิก.....	24
4.3 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	26
4.3.1 การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัด.....	26
4.3.2 การคำนวณหาสภาพความต้านทานไฟฟ้า.....	27
บทที่ 5 วิธีทดลองและผลการทดลอง	
5.1 การออกแบบและการสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยว.....	29

	หน้า
5.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา.....	29
5.1.2 การสร้างเตา.....	29
5.2 การโปรไฟล์เตา.....	32
5.3 การติดตั้งระบบ.....	34
5.3.1 ระบบการไหลแก๊ซอาร์กอน.....	34
5.3.2 ระบบการเลื่อนเตา.....	35
5.4 ขั้นตอนการปลูกผลึกด้วยวิธี PVD	36
5.4.1 วิธีการเตรียมระบบในการปลูกผลึก CdS.....	36
5.4.2 วิธีเตรียมผลึก CdS จากสถานะไอ.....	37
5.4.2.1 ลำดับขั้นตอนการปลูกผลึก CdS.....	37
5.4.2.2 ผลของผลึก CdS ที่ปลูกได้.....	39
5.4.3 วิธีเตรียมฟิล์มบาง CdS.....	39
5.4.3.1 ขั้นตอนการละเหยสาร CdS.....	42
5.4.3.2 ขั้นตอนการแอนนัลฟิล์มบาง CdS.....	43
5.4.3.2 ผลของฟิล์มบาง CdS ที่ปลูกได้.....	44
5.5 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึก CdS ด้วยวิธีขั้วความร้อน.....	44
5.5.1 ขั้นตอนการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึก CdS ด้วยวิธีขั้วความร้อน.....	44
5.5.2 ผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึก CdS ด้วยวิธีขั้วความร้อน.....	45
5.6 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก CdS ในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	45
5.6.1 การระบุระนาบการเลี้ยวเบนของผลึก CdS.....	47
5.6.2 การหาค่าคงที่โครงผลึก CdS.....	52
5.7 การศึกษารอยต่อโอห์มมิก.....	52
5.8 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	61
5.8.1 ขั้นตอนการหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	61
5.8.2 การหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า.....	62
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	70
ภาคผนวก ก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ภาคผนวก ค
ภาคผนวก ง
เอกสารอ้างอิง
ประวัติผู้เขียน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของธาตุ.....	15
(ก) จุดหลอมเหลวที่ 1 บรรยากาศ	
(ข) ความร้อนของการหลอมเหลวที่จุดเดือด	
(ค) จุดเดือดที่ 1 บรรยากาศ	
(ง) ความร้อนของการเป็นไอ	
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของผลึก CdS ด้วยวิธีชี้ความร้อน.....	45



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	3
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	4
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบเวอร์ทซ์ไท์.....	5
รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์.....	6
รูปที่ 3.1 แสดงการปลูกผลึกจากสถานะไอ.....	10
(ก) การปลูกผลึกแบบพลศาสตร์ด้วยวิธีของ Frerichs	
(ข) การปลูกผลึกแบบสถิตศาสตร์ด้วยวิธีของ Greche.	
รูปที่ 3.2 แสดงผลึกที่ปลูกได้ของ Boyd และ Sihvonen.....	11
รูปที่ 3.3 แสดงระบบ และ โปรไฟล์อุณหภูมิในการปลูกผลึกของ Piper และ Polich.....	13
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการปลูกผลึกของ Clark และ Woods	14
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงสมดุลเฟสของ (ก) T-X , (ข) P-T.....	16
รูปที่ 3.6 การไหลแบบการพาโดยวิธีอิสระ.....	17
(ก) สภาวะเสถียร	
(ข) การพาโดยธรรมชาติ	
(ค) สภาวะอุปเสถียร	
รูปที่ 3.7 แสดงการสร้างผิวใหม่ p และ p เพื่อทดสอบความเสถียรของผิว.....	18
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงพลังงานพื้นที่ที่หน้าผลึกต่าง ๆ ใน 3 กรณี.....	19
รูปที่ 3.9 (ก) โปรไฟล์ผิวของการปลูกผลึก.....	20
(ข) รอยต่อที่เกิดจากการโคปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ทำขั้วไฟฟ้า	
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงอัตราการปลูกผลึกเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกที่ผิวหน้าผลึก.....	21
รูปที่ 3.11 แสดงโปรไฟล์ผลึกและเส้นที่มีความชันเท่ากับกราฟรูป 3.9(ข) แบบที่ I.....	22
รูปที่ 4.1 แสดงการตรวจสอบชนิดสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีขั้วความร้อน	23
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงจุดสัมผัสแบบ โอห์มมิก.....	24
(ก) จุดสัมผัสที่กำแพงศักย์ต่ำ	
(ข) จุดสัมผัสที่เกิดจากการโคปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ทำขั้วไฟฟ้า	
รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพ.....	26
(ก) สิ่งประดิษฐ์ โลหะ-สารกึ่งนำ-โลหะ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ระดับพลังงานของสิ่งประดิษฐ์	
รูปที่ 4.4 แสดงผลึก CdS ที่พร้อมจะทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์.....	27
รูปที่ 4.5 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า.....	27
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงฟังก์ชันค่าแก้ f ในการหาสภาพความต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์	28
รูปที่ 5.1 แสดงการหล่อปูนและการพันลวด.....	30
(ก) แสดงแบบในการหล่อท่อปูน	
(ข) แสดงการพันขดลวด	
รูปที่ 5.2 แสดงการหล่อฝาเตา.....	31
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะภายนอกของเตา.....	31
รูปที่ 5.4 แสดงการวางแผนเซรามิกส์ไฟเบอร์.....	32
รูปที่ 5.5 แสดงวงจรควบคุมอุณหภูมิ.....	33
รูปที่ 5.6 แสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ตามระยะของเตา.....	34
รูปที่ 5.7 แสดงระบบการไหลของแก๊ซอาร์กอน.....	34
รูปที่ 5.8 แสดงรูปอุปกรณ์ในการเลื่อนเตา.....	35
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าระหว่างระยะทางในการเลื่อนเตากับเวลา.....	36
รูปที่ 5.10 แสดงท่อควอทซ์ในการปลูกผลึก.....	38
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการโปรไฟล์อุณหภูมิของเตา 2 โซน.....	38
รูปที่ 5.12 รูปแสดงระบบการปลูกผลึกด้วยวิธี PVD.....	40
รูปที่ 5.13 แสดงตำแหน่งของการเกิดผลึก CdS.....	40
รูปที่ 5.14 (ก),(ข) แสดงผลึก CdS ที่ปลูกได้จากการทดลอง.....	41
รูปที่ 5.15 แสดงระบบการปลูกฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีระเหย 1 จุด.....	42
รูปที่ 5.16 แสดงระบบการแอนนัลฟิล์มบาง CdS.....	43
รูปที่ 5.17 แสดงผลของฟิล์มบาง CdS ที่ปลูกได้.....	44
รูปที่ 5.18 แสดงหลักการการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโต มิเตอร์.....	46
รูปที่ 5.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของดิฟแฟรกโต มิเตอร์.....	46
รูปที่ 5.20 แสดงสเปกตรัมระนาบของสารตั้งต้นผลึก CdS ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	48
รูปที่ 5.21 แสดงสเปกตรัมระนาบของฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ แผ่นที่ 1 ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	49

รูปที่ 5.22 แสดงสเปกตรัมระนาบของฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ แผ่นที่ 2 ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	50
รูปที่ 5.23 แสดงสเปกตรัมระนาบของผลึกCdS ที่ปลูกได้ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	51
รูปที่ 5.24 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 70 C ^o จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	53
รูปที่ 5.25 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 80 C ^o จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	54
รูปที่ 5.26 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 90 C ^o จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	55
รูปที่ 5.27 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 100 C ^o จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	56
รูปที่ 5.28 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 100 C ^o จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และฟิล์มบาง CdS.....	57
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงค่าระหว่างความต่างศักย์ และอุณหภูมิที่กระแสที่ค่าต่างๆ ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	58
รูปที่ 5.30 กราฟแสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.....	59
รูปที่ 5.31 แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของผลึก CdS จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสาร และอุณหภูมิ.....	60
รูปที่ 5.32 แสดงรูปของผลึก CdS ที่พร้อมจะทำการวัดสภาพความต้านทาน ไฟฟ้า ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	61
รูปที่ 5.33 แสดงรูปของวงจรที่ใช้ในการวัดความต้านทาน ไฟฟ้า.....	62
รูปที่ 5.34 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP} เมื่อวัดในที่มืด.....	64
(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM} เมื่อวัดในที่มืด.....	65
รูปที่ 3.35 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 2.9 วัตต์/ตารางเมตร.....	66
(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 2.9 วัตต์/ตารางเมตร.....	67
รูปที่ 5.36 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP}	

เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 530.28 วัตต์/ตารางเมตร.....	68
(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM}	
เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 530.28 วัตต์/ตารางเมตร.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

สารประกอบกลุ่ม II - VI และ III - VI เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม สำหรับใช้ทำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้มีการสนใจและศึกษาพัฒนาในด้านเทคโนโลยี และวิทยาศาสตร์มานาน สารประกอบกลุ่ม II - V และ III - V เป็นสารประกอบ ที่มีโครงสร้างพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) มีคุณสมบัติเรืองแสง (phosphor) ทำให้มีประสิทธิภาพสูง,สามารถทำให้เรืองแสงสีต่างๆ, มีช่วงเวลาลดการส่องสว่าง (luminescence decay time) ที่เหมาะสมและมีเสถียรภาพ ในสถานะสารถูกกระตุ้นจึงมีการประดิษฐ์เป็นฉากเรืองแสงในหลอดรังสีคาโทด (cathode ray tube) ของจอโทรทัศน์

สารประกอบกลุ่ม II - VI อันได้แก่ ZnS , ZnSe , ZnTe , CdSe , CdTe , HgS , HgSe , HgTe และ CdS พันธะของสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติอยู่ในช่วงพันธะไอออนิก (ionic bond) กับพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) จึงทำให้มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง ช่องว่างแถบพลังงานฉนวน และธาตุกึ่งตัวนำ จึงทำให้ CdS มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างมีขนาดเป็น 2.42 eV[1] และมีโครงสร้างพลังงานเป็นแบบตรง (direct bandgap energy)

ในโครงการนี้ได้ศึกษาเทคนิคการปลูกผลึก และคุณสมบัติบ่งชี้ของผลึก CdS ซึ่งนอกจากการทราบเทคนิคการปลูกผลึกและสมบัติบ่งชี้แล้วยังเป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาเทคนิคและนำไปประยุกต์ การใช้งานในสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II - VI

การดำเนินการทำโครงการเริ่มจาก

(1) การสร้างอุปกรณ์ในการปลูกผลึกจากสถานะไอด้วยวิธี PVD (Physical vapour desposition) โดยการสร้างเตาไฟฟ้าโซลเดียม และติดตั้งระบบการปลูกผลึก

(2) การพัฒนาระบบการปลูกผลึก CdS จากสถานะไอที่อุณหภูมิ 1100 - 1500°C ในระบบปลายปิดด้านหนึ่ง และปลายเปิดด้านหนึ่งภายใต้บรรยากาศแก๊ซอาร์กอน (Ar) โดยตัดแปลงจากเทคนิคการปลูกผลึกสภาพไอของ Piper และ Polich[2] และเปรียบเทียบการปลูกผลึกจากขบวนการ พาไอระเหย (evaporation)แบบจุดเดียว[3]

(3) ศึกษาโครงสร้างโดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x - rays diffraction)

(4) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึก ได้แก่ การตรวจชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีหัวความร้อน (hot probe method) วัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ (Vander Pauw method) และศึกษารอยต่อโอห์มมิกที่อุณหภูมิต่างๆดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

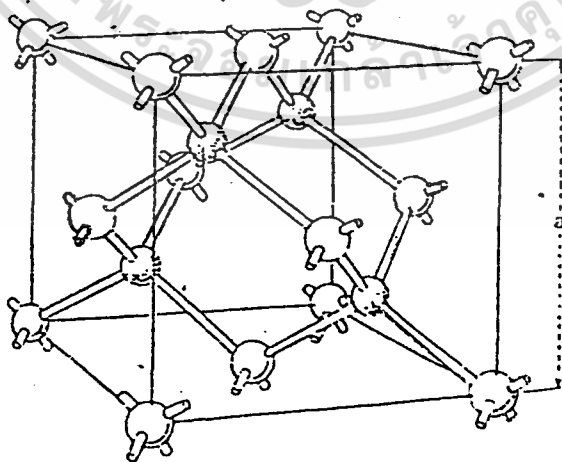
บทที่ 2

โครงสร้างผลึก

โครงสร้างของแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ โดยเรียกกันว่าโครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะตอมในของแข็งทางเรขาคณิตแตกต่างกันทำให้เกิดผลึกที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ในความเป็นจริงผลึกไม่ได้สมบูรณ์ทั้งหมด มักจะมีข้อบกพร่องของโครงผลึกอยู่บ้าง เช่นมีอะตอมของสารชนิดอื่นแทรกเข้าไป หรืออะตอมภายในผลึกเกิดมีช่องว่างทำให้คุณสมบัติของผลึกเปลี่ยนไป เช่นสภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนไป หรือสีของผลึกเปลี่ยน การเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกมีโครงสร้างดังนี้

2.1 โครงสร้างแบบเพชร (diamond structure)[5]

โครงสร้างลักษณะนี้เป็นของสารของธาตุหมู่ IV คือ C, Se, Ge และ α - Sn พิจารณาจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face centered cubic lattice ; fcc; $a=b=c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) ผลึกมาวางซ้อนเลื่อมกัน เป็นระยะทาง $1/4$ ของเส้นทแยงมุมโดย หน่วยเซลล์มี 8 อะตอม และอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกัน มีตำแหน่งที่ $0\ 0\ 0$, $0\ 1/2\ 1/2$, $1/2\ 0\ 1/2$, $1/2\ 1/2\ 0$, $1/4\ 1/4\ 1/4$, $1/4\ 3/4\ 3/4$, $3/4\ 1/4\ 3/4$, $3/4\ 3/4\ 3/4$ อะตอมแต่ละตัวมีพันธะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ที่บิดเบี้ยว ยากและเป็น โครงผลึกที่สมมาตรที่สุดในจำนวน โครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้



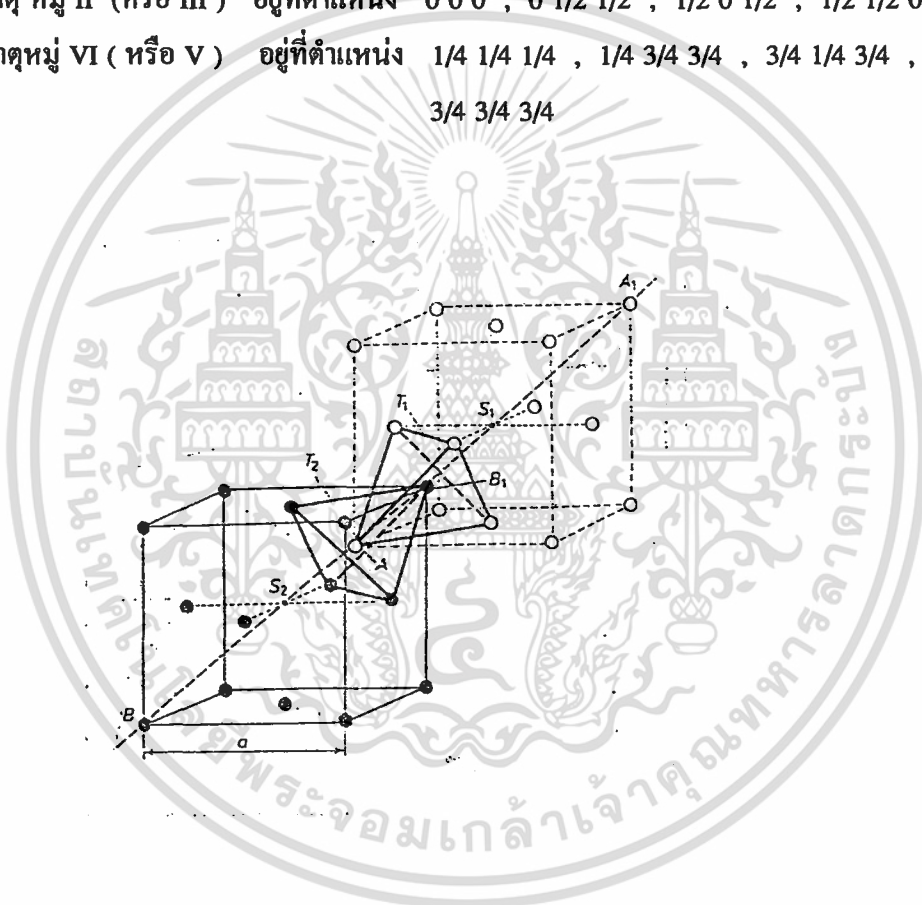
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร[5]

2.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (Sphalerite or Zincblende structure)[4]

โครงสร้างแบบนี้มักพบในสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม II - VI และ II - V เช่น ZnSe , CdS , CdTe และ ZnS เป็นต้น มีโครงสร้างคล้ายโครงสร้างแบบเพชร คือมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก 2 โครงสร้างซ้อนกัน โครงสร้างแรกเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) โครงสร้างที่ 2 เป็นธาตุหมู่ V (หรือ VI) เมื่อประกอบเป็นสารกึ่งตัวนำพบว่า 1 เซลประกอบไปด้วยอะตอม 2 ชนิดแต่ละชนิดมี 4 อะตอม และมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากับ a

ธาตุ หมู่ II (หรือ III) อยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ 0$, $0\ 1/2\ 1/2$, $1/2\ 0\ 1/2$, $1/2\ 1/2\ 0$

ธาตุหมู่ VI (หรือ V) อยู่ที่ตำแหน่ง $1/4\ 1/4\ 1/4$, $1/4\ 3/4\ 3/4$, $3/4\ 1/4\ 3/4$, $3/4\ 3/4\ 1/4$



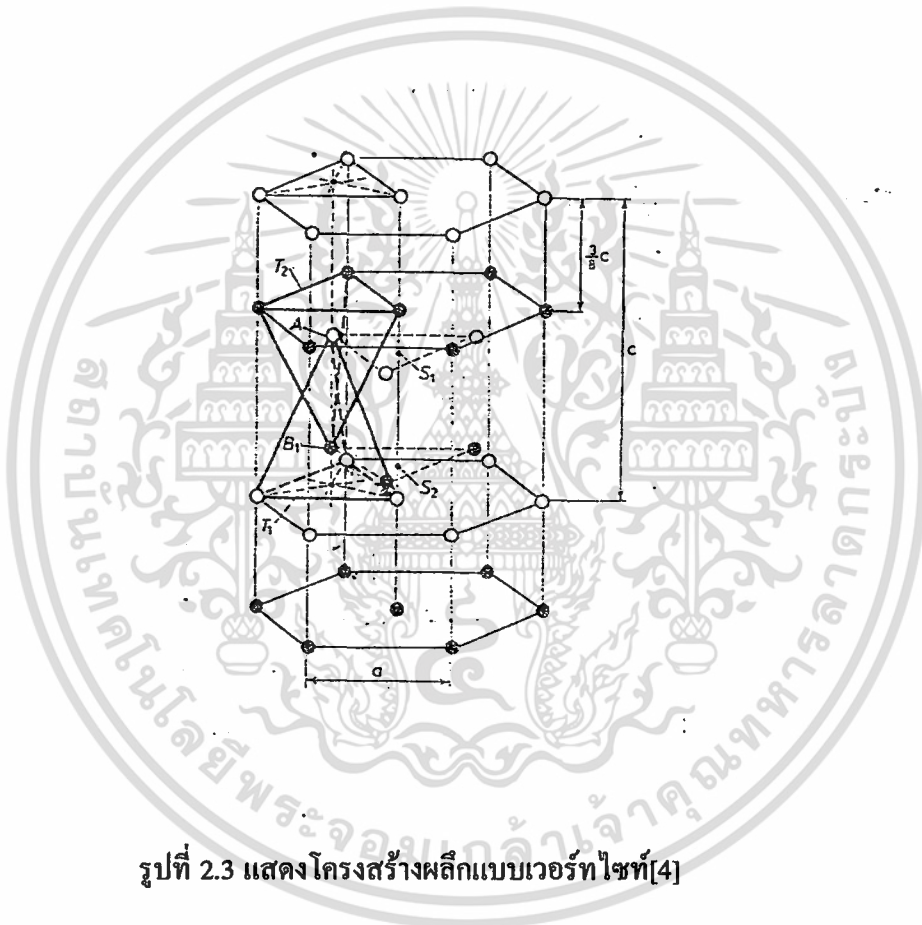
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์[4]

2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (Wurtzite structure)[4]

โครงสร้างเวอร์ทไซต์อยู่ใน Space group มี 2 โมเลกุลใน 1 หน่วยเซลล์ (ปริซึมหกเหลี่ยม) คือ สารประกอบของธาตุหมู่ II - VI มีค่าคงที่โครงสร้างผลึก 2 ค่าคือ a และ b ธาตุหมู่ II อยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ 0$, $1/3\ 2/3\ 1/2$ และธาตุหมู่ IV อยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ U$, $1/3\ 2/3\ 1/2 + U$ เมื่อ $U = 0.38$ แต่ละอะตอมธาตุหมู่ II จะสร้างพันธะ 4 อะตอมธาตุหมู่ VI จะอยู่ที่ประมาณรูปทรงสี่หน้า โดยธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ VI 1 อะตอมอยู่ห่างเป็นระยะ UC และอีก 3 อะตอมอยู่ห่างเป็นระยะ $\frac{1}{3}a^2$ มีอะตอมใกล้เคียง 12 อะตอม โดย 6 อะตอมอยู่ที่มุมหกเหลี่ยมที่ระนาบเดียวกันระยะ a อีก 6 อะตอมอยู่ที่มุมปริซึมฐานสามเหลี่ยมเป็นระยะ $(\frac{1}{3}a^2 + \frac{1}{4}c^2)^{1/2}$ ถ้า $c/a = 2\sqrt{2}\sqrt{3} = 1.6330$ และ $U = 0.38$ แล้วอะตอมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจะอยู่ที่มุมของรูปทรงสี่หน้าและระยะของ 12 อะตอมที่ใกล้เคียงจะห่างเท่ากัน การบิดเบี้ยวของโครงผลึกเกิดจากพันธะบางส่วนมีขั้ว



รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์[4]

2.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

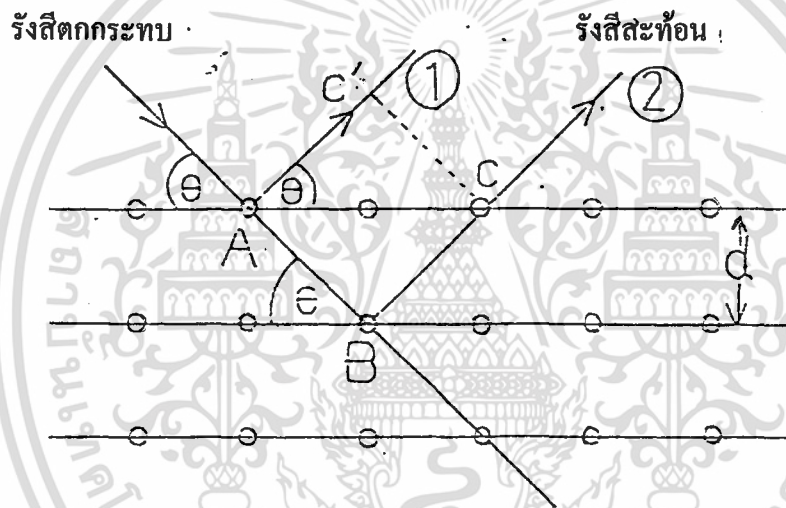
ในการศึกษาผลึกของสารกึ่งตัวนำนั้น เริ่มต้นจากการเตรียมผลึก CdS จากบริษัท บด ให้ละเอียดเป็นผงและแบบฟิล์มบาง ก่อนที่จะนำผลึกไปศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ใดๆ ต้องตรวจสอบโครงสร้างของผลึกก่อนโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) เพื่อเป็นการตรวจสอบโครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

เริ่มต้นจะต้องทราบถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากระนาบของผลึก เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าคงที่ของผลึกจะทำให้ทราบถึงความสมบูรณ์ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากอะตอมในผลึก[5]

ในที่นี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ในการวิจัยโดยมีความยาวคลื่น (λ) 1.5405 \AA เมื่อรังสีตกกระทบบอะตอมในผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบน เพราะอิเล็กตรอนของอะตอมในผลึกสั่นเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ค่าเดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบ จากกฎของแบรกก์ (Bragg Law) เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวเป็นระนาบในผลึก ดังรูปที่ 2.4 โดยที่ความยาวคลื่นต้องสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม (d) โดยอะตอมจะกระเจิงรังสีเอ็กซ์ออกมาทำให้ดูเหมือนว่ารังสีเอ็กซ์ เกิดการสะท้อนออกเป็นมุม θ ซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบบ



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์ [5]

จากรูปคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 มีการแทรกสอดแบบเสริม โดยคลื่นทั้งสองมีค่าต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น (Δ)

$$\Delta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{---- (2.1)}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= AB + BC - AC \\ &= 2AB - AC \end{aligned}$$

ให้ $AB = d/\sin \theta$ ---- (2.2)

และ $AC = AC' \cos \theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AC = (2d/\tan\theta) \cos\theta \quad \text{---- (2.3)}$$

แทนค่าสมการ (4.2) และ (4.3) ลงใน (4.1) ทำให้ได้สมการของกฎของแบรกก์ คือ

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad \text{---- (2.4)}$$

สำหรับค่าคงที่ของผลึกจะหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ (h k l) ซึ่ง h , k , l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0 , 1 , 2 ... เรียกว่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกของระบบผลึก (crystal systems) ของสารประกอบ CdS คือ

โครงสร้างคิวบิก (cubic)

$$1/d^2 = (h^2 + k^2 + l^2)/a^2 \quad \text{----(2.5)}$$

โครงสร้างพีระกหกหน้า (hexagonal)

$$1/d^2 = (4/3)(h^2 + hk + k^2)/a^2 + l^2/c^2 \quad \text{----(2.6)}$$

2.4.2 สถานะการเลี้ยวเบนสำหรับเซลล์ 1 หน่วยของ CdS

การวิเคราะห์ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับเซลล์ 1 หน่วยของ CdS

สามารถแสดงได้สมการ

โครงสร้างคิวบิก

$$d_{hkl} = a/(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} \quad \text{----(2.7)}$$

$$\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{----(2.8)}$$

$$a = \lambda(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}/2\sin\theta \quad \text{----(2.9)}$$

โครงสร้างพีระกหกหน้า

$$d_{hkl}^2 = [1/(4/3)(h^2 + k^2 + l^2)/a^2] + (1/c^2) \quad \text{----(2.10)}$$

$$\lambda^2 = 4d^2 \sin^2\theta \quad \text{----(2.11)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = 2d \sin\theta \left[\frac{1}{4/3} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \left(\frac{1}{c} \right)^2 \right] \quad \text{---(2.12)}$$

ในการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก Cds ได้นั้นต้องทราบโครงสร้างผลึกจากกราฟที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer) ก่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

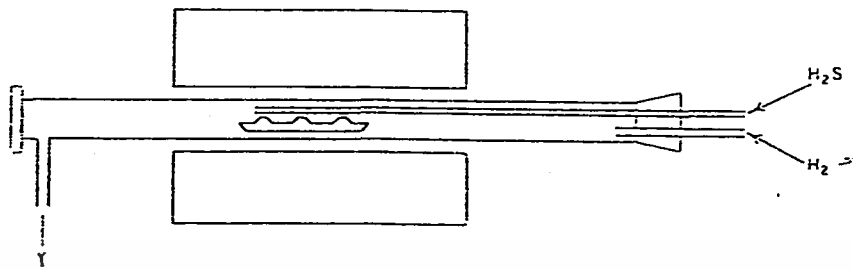
การปลูกผลึก

ในการศึกษาสารประกอบกลุ่ม II - VI พบว่า แคดเมียมซัลไฟด์ มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมาก โดยจะหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1720°C และระเหิดที่อุณหภูมิ 1500°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ $\approx 10^{-5}$ มิลลิบาร์ การปลูกผลึกครั้งนี้ จะเริ่มจากการศึกษาการปลูกผลึกในสภาวะไอ, การไหลของแก๊ส, อัตราการแพร่ของไอสารประกอบ และ การเกิดผลึก ซึ่งจะคำนวณลักษณะการเกิดผลึกที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ เพื่อให้ได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์และบริสุทธิ์ ซึ่งมีการควบคุมสิ่งเจือปน โดยเริ่มจากการทดลองปลูกผลึกในสภาวะไอ, ลักษณะผลึกที่ปลูกได้ และนำผลึกที่ได้ไปศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ

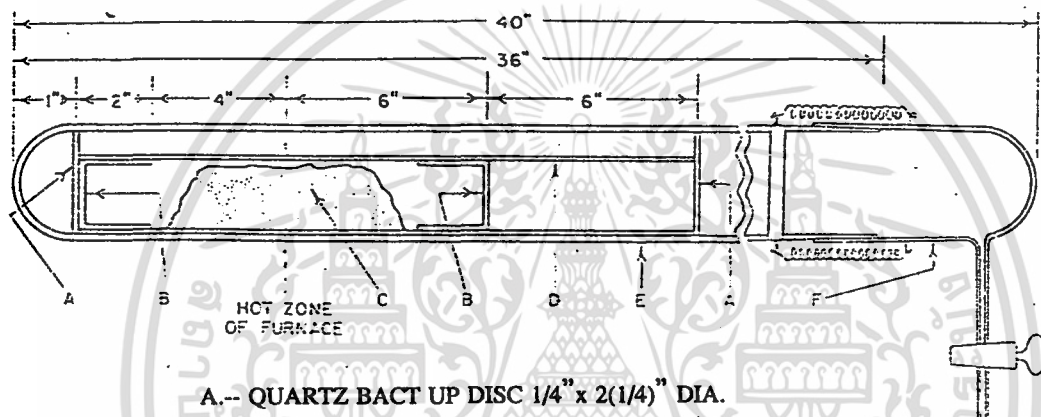
ในระยะแรกของการปลูกผลึกจะได้ผลึกจากวิธีการปลูกผลึกจากสภาวะไอ ผลึกที่ได้มีเกรนขนาดใหญ่มากแต่ยังมีข้อจำกัดบางประการ คือความไม่สมบูรณ์ของผลึกและเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก

3.1. เทคนิคการปลูกผลึกสภาวะไอ[3]

ในการปลูกผลึกแบบสภาวะไอมีหลักการดังนี้ คือทำให้มีการไหลของไอสารประกอบหรือไอที่เกิดจากการรวมตัวของธาตุหมู่ II - VI ในสภาวะที่เป็นไอเมื่อให้ไอของธาตุหรือสารประกอบแพร่ไปยังบริเวณที่จะทำให้เกิดการอิ่มตัวผกผัน (supersaturated) ทำให้เกิดผลึกขึ้น ซึ่งหลักการนี้สามารถแบ่งเป็น 2 เทคนิค คือแบบพลศาสตร์ (dynamic) และแบบสถิตศาสตร์ (statics) ในแบบพลศาสตร์มีระบบ ดังรูปที่ 3.1(ก) สารตั้งต้นจะเคลื่อนที่ไปกับแก๊สพาหะ (carrier gas) ที่ไหลผ่านระบบตลอดเวลา ในรูปโลหะ M ถูกเผากลายเป็นไอ แล้วทำการไหลแก๊ส H_2 หรือแก๊สเฉื่อยอื่น ๆ เพื่อที่จะเป็นตัวนำไอของโลหะ M ไปทำปฏิกิริยากับแก๊สของสารประกอบของไฮโดรเจนกับธาตุหมู่ VI คือ H_2N ทำให้เกิดผลึกขึ้นที่ท่อควอร์ตซ์มีลักษณะเป็นแผ่น, รูปเข็มหรือเป็นสายริบบอน ซึ่งวิธีแบบพลศาสตร์นี้ดีตรงที่สามารถปลูกผลึกจากธาตุได้ดี ไม่ต้องใช้สารประกอบแต่ได้ผลึกขนาดเล็ก



รูปที่ 3.1 (ก)



- A.-- QUARTZ BACT UP DISC 1/4" X 2(1/4)" DIA.
 B.-- SEED PLATE 2" X 3/4" DIA.
 C.-- CdS OR ZnS POWER
 D.-- QUARTZ LINER 18" X 12" DIA.
 E.-- MULLITE TUBE 38" X 2(1/2)" DIA., WITH ONE
 END GROUNDED TO FIT (F)
 F.-- GROUND GLASS VACUUM CAP.

รูปที่ 3.1 (ข)

รูปที่ 3.1 แสดงการปลูกผลึกจากสภาวะไอ

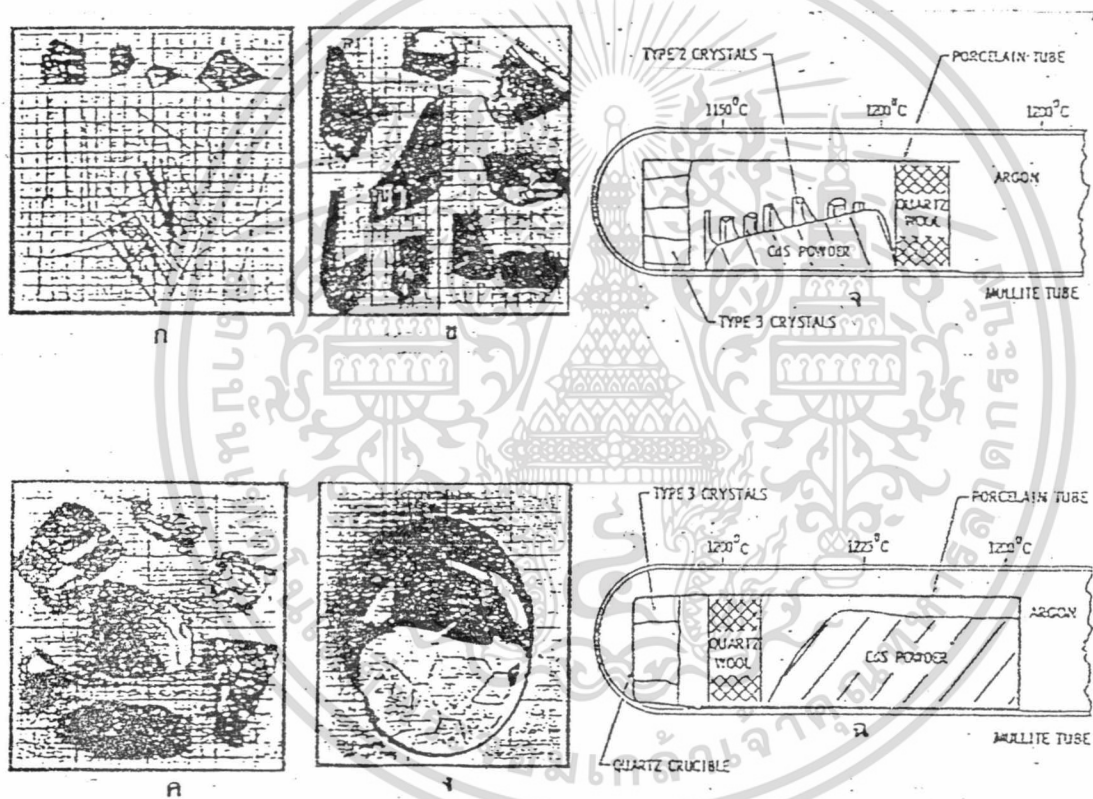
(ก) การปลูกผลึกแบบพลศาสตร์ด้วยวิธีของ Frerichs[6]

(ข) การปลูกผลึกแบบสถิตศาสตร์ด้วยวิธีของ Greene[6]

การปลูกผลึกจากสภาวะไอแบบสถิตศาสตร์มีระบบดังรูปที่ 3.1(ข) ซึ่งเมื่อสารตั้งต้นอยู่ในสภาวะไอ จะเคลื่อนที่โดยการแพร่เกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติแล้ว นิยมใช้สารประกอบเป็นสารตั้งต้นแบบผง (powder) โดย Reyhdds Czyzak[3] เริ่มใช้วิธีนี้เป็นครั้งแรก ต่อมาได้ทำการพัฒนาวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบพลศาสตร์ จนกระทั่งสามารถปลูกผลึก CdS และ ZnSe ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ 110 กรัม โดยสารตั้งต้นต้องเป็นสารประกอบที่บริสุทธิ์ ถูกวางลงบริเวณที่มีความร้อนมากที่สุดดังรูปที่ 3.2 เกรเดียนต์ของเตาลดลงประมาณ 100°C จากโซนสารตั้งต้นกับโซนของบริเวณตกผลึก ทำการไหลแก๊ส H_2S หรือ N_2 เข้าไปในระบบหลายๆครั้ง แล้วจึงปิดระบบโดยที่ภายในระบบมีความดันประมาณ 760-900 มิลลิเมตรปรอท ตัวอย่างผลึกที่ได้จากรายงานของ Boyd และ Sihvonen[5] ผลึกเดี่ยวสามแบบที่ได้จากการปลูกสภาวะไอมีดังนี้



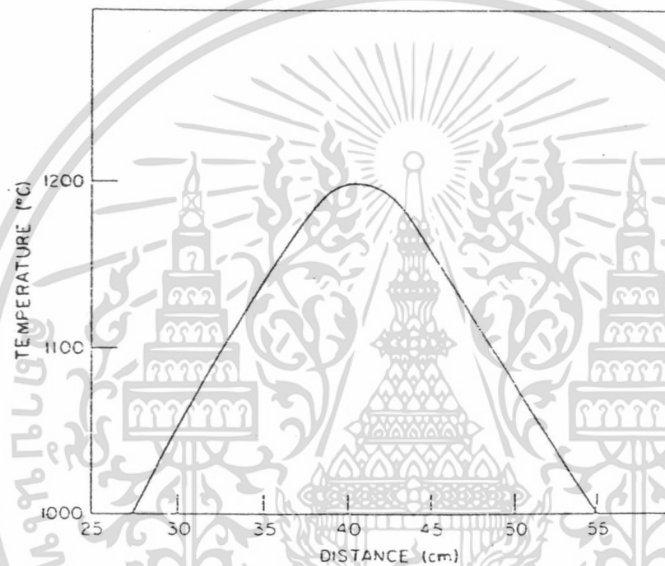
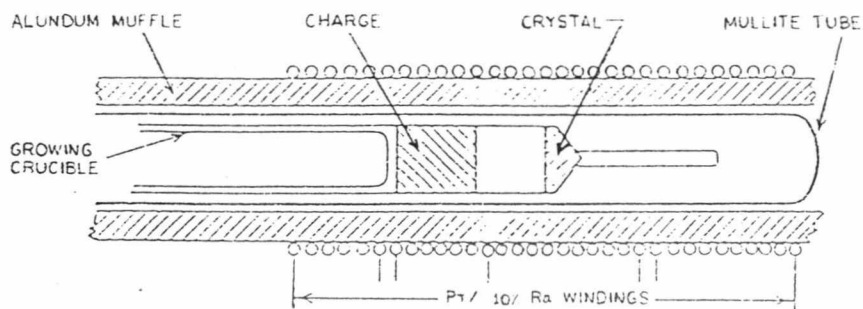
รูปที่ 3.2 แสดงผลึกที่ปลูกได้ และระบบที่ใช้ในการปลูกผลึกของ Boyd และ Sihvonen[3]

- (ก) ผลึกที่ปลูกได้แบบที่ 1
- (ข) ผลึกที่ปลูกได้แบบที่ 2
- (ค) และ (ง) ผลึกที่ปลูกได้แบบที่ 3
- (จ) ระบบที่ใช้ในการปลูกผลึกแบบที่ 2
- (ฉ) ระบบที่ใช้ในการปลูกผลึกแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกแบบที่ 1 เป็นผลึกที่เกิดขึ้นที่บริเวณผนังแก้วควอทซ์ มีลักษณะเป็นแผ่นหรือแท่งตั้งรูป (ก) ซึ่งรูปผลึกจะคล้ายกับ Frerichs แบบที่ 2 เป็นผลึกที่เกิดขึ้นบริเวณสารตั้งต้นตั้งรูป (จ) มีลักษณะเป็นปริซึมหลายเหลี่ยมจะเกิดได้ดีถ้ามีความดันของแก๊สคงที่ แบบที่ 3 ผลึกเกิดบริเวณปลาย quartz crucible มีขนาดใหญ่และสมบูรณ์มาก ที่ผิวหน้าจะพบเกรนที่แสดงรอยต่อระหว่างผลึกอย่างชัดเจน ในรูป(ค) , (ง)

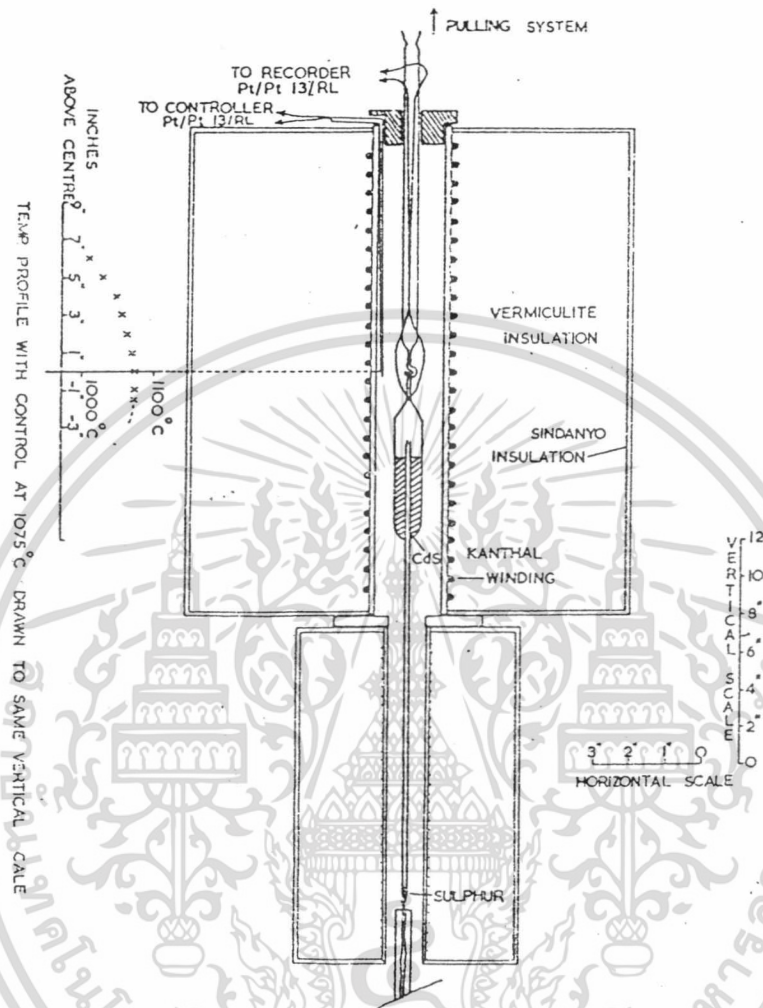
จากการปลูกผลึกสภาวะไอแบบสถิติศาสตร์ Piper และ Polich[2] ได้พัฒนาการปลูกผลึกจนสามารถปลูกผลึกเดี่ยวของ CdS ได้ก้อนใหญ่ ขนาด 20 เซนติเมตร³ และสามารถปลูกผลึกของสารประกอบ II - VI โดยที่สารตั้งต้นเป็นชนิดผงได้ดี และความยาว -ขนาดของผลึกจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิโปรไฟล์ของเตา รูปที่ 3.3 แสดงหน้าตัดของระบบของเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยว (furnace) และเบ้าหลอม (crucible) ด้านล่างจะแสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ของเตาสำหรับสารประกอบ CdS ซึ่งสารประกอบของหมู่ II - VI ชนิดอื่นอุณหภูมิโปรไฟล์ของการปลูกผลึกจะมีลักษณะแตกต่างกัน จากรูปภายในมุลไลท์ (mullite tube) ปลายปิด 1 ด้าน จะมีสารตั้งต้นวางไว้ระยะห่างจากบริเวณกำเนิดผลึกตามระยะทางจากกราฟด้านล่างโดยให้ปลายของบริเวณที่เกิดผลึกเป็นรูปกรวย เพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสขึ้น (nucleation) ของการเกิดผลึกเพียง 1 จุดเท่านั้น และจะมีท่อควอทซ์เล็ก ๆ ต่อจากปลายแหลม เพื่อช่วยถ่ายเทความร้อนขณะกลายเป็นผลึกที่ปลายอีกด้านของสารตั้งต้นจะมีท่อควอทซ์ปลายปิดขนาดพอดีที่จะสอดปิดควอทซ์ที่ใช้ปลูกผลึก ขั้นตอนการปลูกผลึกให้ความร้อนที่ขดลวดแพลททินัม 10% โรเดียม ทำความดันภายในระบบให้เป็นสูญญากาศเมื่ออุณหภูมิถึง 500°C ทำการไหลแก๊สอาร์กอนเพื่อไล่สิ่งสกปรกภายในระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และคงความดันไว้ที่ 1 บรรยากาศ (อุณหภูมิช่วงนี้ 500 - 700 °C) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอยู่ในระหว่าง 900 - 1000 °C ทำการไหลแก๊ส H₂S เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นการทำให้ไอของสารตั้งต้นบริสุทธิ์ขึ้นประมาณ 20-80 % เนื่องจากแก๊ส H₂S จะไปทำปฏิกิริยาเคมีกับ CdO ได้เป็น H₂S + CdO → CdS + H₂O เนื่องจากการเตรียมสารประกอบตั้งต้นไม่บริสุทธิ์เพียงพอ เมื่อให้ความร้อนถึง 1150°C สารประกอบ CdS จะระเหิดออกมาจากนั้นทำการเลื่อนเตาจากปลายแหลมที่มีอุณหภูมิสูงสุดไปยังสารประกอบตั้งต้นด้วยอัตราเร็ว 0.3 - 1.5 มิลลิเมตร/ชั่วโมง โดยหลอดปลายกรวยแหลมจะค่อยๆเย็นลง ส่วนไอของ CdS ที่ออกมาทางควอทซ์ที่แคบสารตั้งต้นจะแข็งเกาะติดบริเวณที่เย็นกว่า ทำให้ระบบถูกปิดผลึกเดี่ยวจะเกิดจากบริเวณปลายแหลมในอัตราที่เท่ากันกับการเลื่อนเตาและอุณหภูมิระหว่างสารตั้งต้นกับบริเวณที่เกิดผลึกห่างกัน 30 °C



รูปที่ 3.3 แสดงระบบและโปรไฟล์อุณหภูมิในการปลูกผลึกของ Piper and Polich[2]

หลักการปลูกผลึกของ Clark และ Woode[7] ได้พัฒนาจากเทคนิคการปลูกผลึกของ Piper และ Polich โดยการปลูกผลึก CdS ภายใต้บรรยากาศแก๊ส S (หรือ Cd) ระบบมีส่วนประกอบดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการปลูกผลึกของ Clark และ Woods[7]

แก๊ส S (หรือ Cd) ที่จะไหลเพิ่มเข้ามาในระบบจะถูกทำให้ไหลผ่านท่อจากด้านล่าง เพื่อเข้าไปในคอกซ์ที่ใช้ปลูกผลึกโดยภายในทำให้เป็นสุญญากาศขณะหลอมปิดเตาจะมี 2 เตา เตาบนมีอุณหภูมิ 1150°C ส่วนเตาล่างมีอุณหภูมิ $50 - 770^{\circ}\text{C}$ ขณะเริ่มต้นทำการปลูกผลึกแก๊ส S (หรือ Cd) กับสารตั้งต้นถูกวางไว้ด้านล่างของกลางเตาแล้ว ดึงคอกซ์ด้วยอัตราเร็ว 12 มิลลิเมตร/ชั่วโมง เมื่อเริ่มมีความร้อนที่คอกซ์จะระเหยออกไปทำให้ปลายคอกซ์สะอาดขึ้นส่วนแก๊ส S (หรือ Cd) ที่ใส่เข้าไปจะหลอมตัวปิดปลายคอกซ์เล็กน้อย และประพุดตัวเป็นแหล่งกำเนิด S (หรือ Cd) ช่วยควบคุมความดันไอของธาตุขณะทำการปลูกผลึกเมื่อคอกซ์ถูกดึงถึงกลางเตาเกิดนิวคลิออนที่ปลายแหลม ทำให้เกิดผลึกจึงทำการลดความเร็วในการดึงเป็น 0.6 มิลลิเมตร/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุณหภูมิบริเวณสารตั้งต้นและตำแหน่งเกิดผลึกต่างกัน 10°C การลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความเครียดในผลึกแต่ถ้าลดอุณหภูมิช้าจะทำให้เกิดความเครียดน้อยไม่ประปรายแต่ความดันย่อยจะลดลง ถ้าเพิ่มความดันย่อยจะต้องเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิเป็น 50°C เพื่อชดเชยกับอัตราการปลูกผลึก

3.2 ทฤษฎีการปลูกผลึกจากสภาวะไอ[3]

เมื่อทราบถึงเทคนิคต่างๆของการปลูกผลึกจากสภาวะไอแล้ว ยังมีปัจจัยที่มีผลต่อการปลูกผลึกในสภาวะไอ ดังนี้

3.2.1 อุณหพลศาสตร์ ของ CdS[3]

สารประกอบ CdS จะมีธาตุที่มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน ในลักษณะสารประกอบ II - VI ประกอบไปด้วย Cd ,Zn , S , Se , และ Te ซึ่งจุดหลอมเหลวของธาตุแต่ละตัวแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของธาตุ[3]

element	M.P.(C) ^a	Ah _m (kcal/g.f.w.) ^b	B.P.(C) ^c	AH _v (kcal/g.f.w.) ^d
Zn	420	1.765	908	27.56
Cd	321	1.45	765	23.87
S	119	0.337	445	2.3
Se	217	1.3	685	6.29
Te	450	4.18	987	12.1

M.P. — จุดหลอมเหลวที่ 1 บรรยากาศ

Ah_m — ความร้อนของการหลอมเหลวที่จุดหลอมเหลว (M.P.)

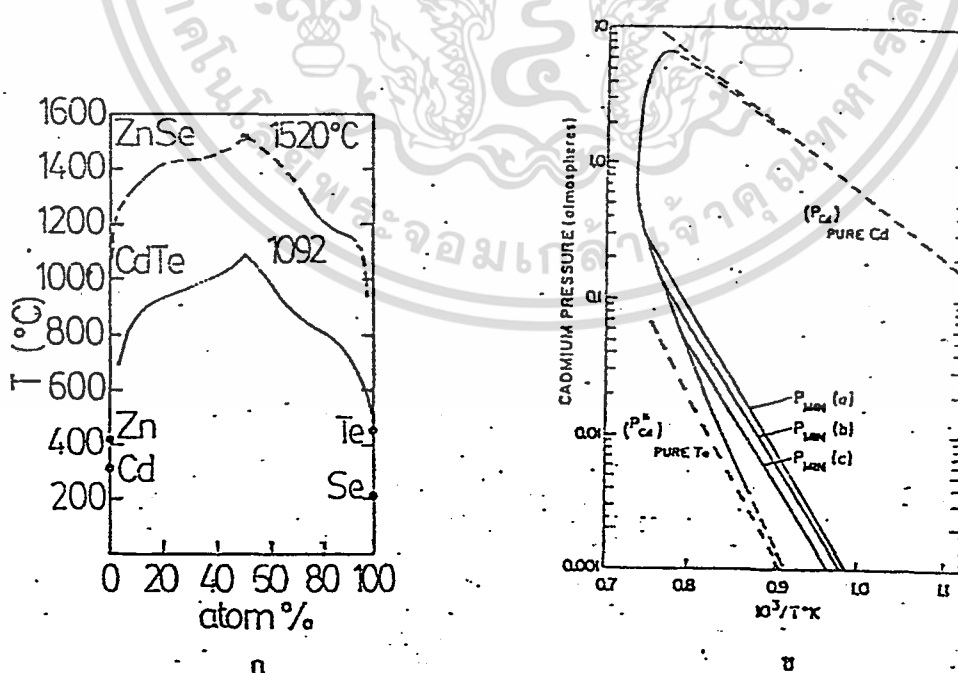
B.P. — จุดเดือดที่ 1 บรรยากาศ

AH_v — ความร้อนของการกลายเป็นไอ

เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้ธาตุอยู่ในสถานะแก๊สได้ดีกว่าของเหลว Cd, Zn จะเป็นไออะตอมเดี่ยว ส่วนไอของ S , Se และ Te มีหลายแบบขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ เช่น Se สามารถอยู่ในรูปไอของ Se , Se₂ และ Se₆

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าเมื่อนำธาตุหมู่ II และ IV มาทำเป็นสารประกอบ II - VI (MN) พบว่ามีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก และมีความดันไอที่ต่ำที่อุณหภูมิสูงสารประกอบ MN จะแตกตัวตามปฏิกิริยา $nMN(s) = nM(g) + N_n(g)$ ถ้าเกิดมีโมเลกุลในสถานะแก๊ส (MN(g)) ควรจะมีปริมาณน้อยเพราะความดันของ M หรือ N_n จะหยุดการระเหิดของสารประกอบ อุณหพลศาสตร์จะบ่งบอกถึงสมดุลเฟสของสารประกอบซึ่งใช้อธิบายในการเกิดสารประกอบ MN ของอัตราส่วน M และ N จากการปลูกผลึกในสภาวะไอจะเป็นการสมดุลระหว่าง (s) - (g) โดยปกติแล้วเส้นลิวิดัส (liquidus) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสารประกอบ II - VI ส่วนมากหาได้เพียงบางสัดส่วนขององค์ประกอบเท่านั้น เนื่องจากทดลองที่อุณหภูมิสูง แต่สำหรับสารประกอบ CdTe สมดุลเฟสหาได้ตลอดช่วง ทำให้สามารถประมาณช่วงที่ไม่ทราบค่าของสารประกอบตัวอื่นได้ จากรูปที่ 3.5(ก) ที่จุดยอดของเส้นลิวิดัสใกล้กับจุดหลอมเหลวสูงสุด (T_m) มีการรวมตัวกันในสภาวะหลอมเหลว (เกิดอัตรกิริยาระหว่าง M และ N) เส้นลิวิดัสจะหักลงทันที ในบริเวณธาตุบริสุทธิ์ และเป็นเส้นเรียบแบบ ขณะมีการหลอมจะแยกกัน (ประกอบไปด้วยอะตอมของ M และ N) ในรูปที่ 3.5 ข เส้นประแสดงความดันย่อยของ Cd ใน Cd และ Te บริสุทธิ์ ให้ P_{min} แทนความดันสมดุลระหว่าง (s) : (g) ถ้าต้องการปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวสารตั้งต้นต้องมีความดันไอสูง แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C ความดันไอของสารประกอบจะน้อย ทำให้อัตราการปลูกผลึกน้อยลงต้องทำการไหลของแก๊สเพิ่มผ่านเข้าไปในระบบ



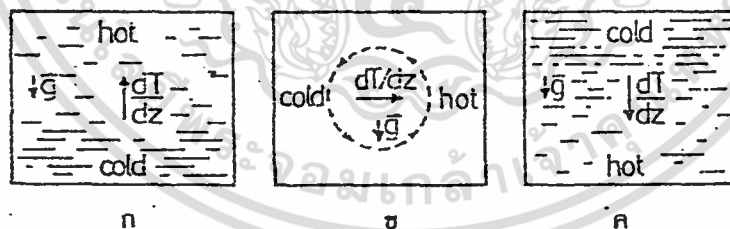
รูปที่ 3.5 แผนภาพสมดุลเฟสของ CdSe (ก) T-X, (ข) P-T [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การไหลของแก๊ส[3]

การไหลของแก๊สเคลื่อนที่ผ่านท่อเป็นชั้น ๆ พร้อมกัน ๆ ทำให้เกิดความเร็วดังกันเล็กน้อย โดยลักษณะความเร็วในแนวภาคตัดขวางมีลักษณะเป็นโปรไฟล์พาราโบลา เมื่อมีการไหลเป็นชั้น (ซึ่งเป็นการเปลี่ยนขนาดของท่อทันที) ทำให้โมเมนตัมเปลี่ยนไปเกิดเป็นกระแสไหลวน (vortex) เนื่องจากมีความเร็วเฉลี่ยมากขึ้น ทำให้เกรเดียนต์ของความเร็วยาวขึ้นตามส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างท่อมากขึ้นเกิดความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับการไหล การไหลจะเปลี่ยนไปไม่ราบเรียบ (turbulent) จากการที่มีอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการไหลภายใต้แรงดึงดูดโลกทำให้เกิดการไหลในสภาพของการพาโดยอิสระ (free convection) ผลของเอนทรานซ์ (entrance effect) เป็นผลทางจลนพลศาสตร์ของไหลได้แก่ การที่ของไหลไหลเข้าท่อที่มีขนาดหรืออุณหภูมิใหม่ ดังนั้น โปรไฟล์อุณหภูมิหรือความเร็วจะเปลี่ยน

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกถึงลักษณะการไหล คือ เลข (Reynolds) $Re = Vh\rho/\eta$ เมื่อ V เป็นอัตราการไหลเฉลี่ย, h เป็นความสูงของท่อ, ρ เป็นความหนาแน่น และ η เป็นความหนืดของแก๊ส การไหลแบบลามินาร์ (การเคลื่อนที่ผ่านแก๊สในแต่ละชั้นๆพร้อม ๆ กัน) Re มีค่าน้อยหรือน้อยกว่าเลข Reynold วิกฤต (สำหรับการไหลในท่อ $Re_{crit} = 2300$) ถ้า $Re > Re_{crit}$ จะเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (turbulent) ที่อุณหภูมิสูง ρ น้อย ค่า η มากขึ้น ทำให้ Re ลดลง สำหรับค่า Re ของธาตุ H_2 , He , N_2 และ Ar จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ ดังนั้น H_2 และ He เมื่อปลุกผลึกในสถานะไอจึงเสถียรมาก



รูปที่ 3.6 การไหลแบบการพาโดยอิสระ[3]

- (ก) สภาวะเสถียร
- (ข) การพาโดยธรรมชาติ
- (ค) สภาวะอุปเสถียร

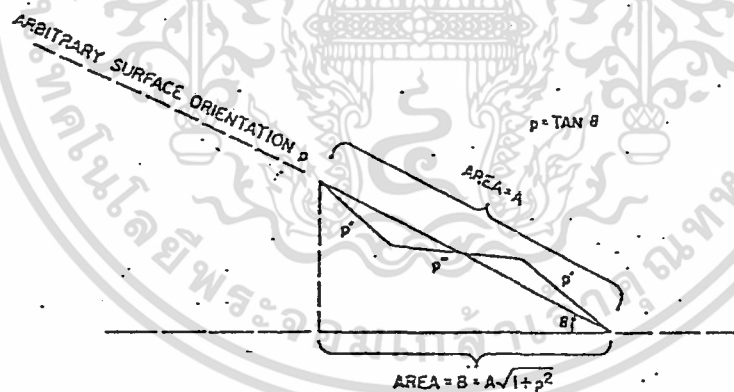
เกรเดียนต์อุณหภูมิของหลอดปิด ($\frac{dT}{dz}$) เป็นตัวกำหนดทำให้เกิดการไหลแบบการพาอิสระซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของก๊าซที่ต่างกัน จากรูปที่ 3.6(ก) พบว่าระบบจะเสถียรเมื่อความร้อนอยู่ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\frac{dT}{dz}$ มีทิศชี้ขึ้นด้านบน แต่ถ้า $\frac{dT}{dz}$ มีทิศตั้งฉากกับแรงดึงดูดโลก ระบบจะไม่เสถียร ดังรูปที่ 3.6(ข) และถ้า $\frac{dT}{dz}$ มีทิศชี้ลงล่างดังรูปที่ 3.6(ค) ระบบจะอุปเสถียรคือ มีการแพร่ของความร้อนมากความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยการเปลี่ยนโมเมนตัมอยู่ในระดับจุลภาค (microscopic) มีความเร็วมากจนไม่มีจริงในมหภาค (macroscopic) แก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่ในแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำได้

3.2.3 จลนพลศาสตร์ ของการปลูกผลึก[3]

โดยจะทำการศึกษาผิวผลึกในสภาวะสมดุลและการขยาย (เคลื่อน) ของผิวผลึกในการปลูกผลึก (จลนพลศาสตร์ของการปลูกผลึก) ผิวผลึกใดๆในสภาวะสมดุลเขียนแทนด้วย $z = z(x,y)$ ผิวหน้าผลึกที่กำหนดจาก x,y และ พิจารณารูป กรณีสี่เหลี่ยม ($z = z_0 - \rho x, q = 0$) พื้นที่ผิวผลึก (A) บนผิวอ้างอิง ($z = 0$) สามารถเขียนได้เป็น $B = A / (1 + p^2)^{1/2}$ พลังงานพื้นผิว (surface energy) ของผิว A มีค่าเท่ากับ $\alpha(p) A$ เขียนในเทอมของผิวอ้างอิงได้เป็น $F = \alpha(p) (1 + p^2)^{1/2} B = \beta(p) B$ พิจารณาความเสถียรของผิว A โดยสร้างผิวใหม่ให้มีหน้าผลึกต่างกันเล็กน้อย ($p' = p, p'' = p + \delta p''$) และยังมีปริมาตรเท่าเดิม ($pB = p' B' + p'' B''$ เมื่อ $B = B' + B''$) ดังรูปที่ 3.7 พลังงานของผิวใหม่เขียนได้ $F' = \beta(p') B' + \beta(p'') B''$



รูปที่ 3.7 แสดงการสร้างผิวใหม่ p' และ p'' เพื่อทดสอบความเสถียรของผิว[3]

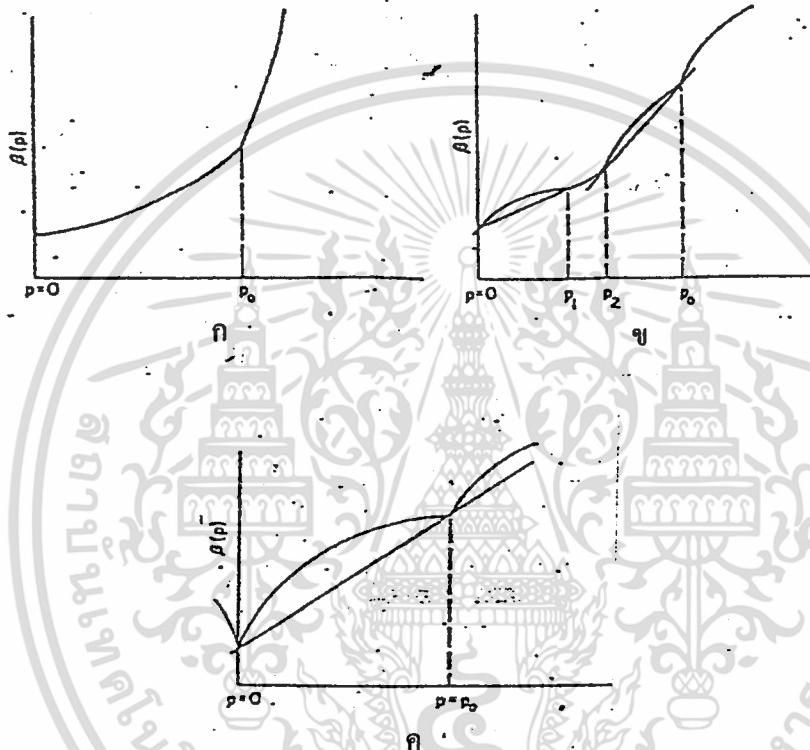
ดังนั้นพลังงานพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นดังนี้

$$\Delta F = F' - F = \beta''(p) [\beta'(p) (\delta p')^2 + \beta''(p) (\delta p'')^2] \quad \text{----(3.1)}$$

เมื่อ $\beta' = d\beta / dp$ และ $\beta'' = d^2\beta / dp^2$ เนื่องจากปริมาตรคงเดิมทำให้เทอมอันดับศูนย์และอันดับหนึ่งของ $\delta p'$ และ $\delta p''$ จะเป็นศูนย์ จากหลักการการแปรผัน (variational principle) ของอุณหพลศาสตร์ ผิว A จะเสถียรเมื่อ $\Delta F > 0$ นั่นคือ $\beta'' > 0$ ดังนั้นกราฟระหว่าง β และ p จะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโค้งหงาย รูปที่ 3.8(ก) ผลึกทุกหน้าเสถียรรูปที่ 3.8(ข) ผิวหน้าผลึกเสถียรในช่วง p_1 ถึง p_2 แต่ทั้ง 3 กรณี ผิวหน้าผลึกจะเสถียรที่ $p = 0$ และ $p = p_0$ จะเรียกผิวหน้าจุดนี้ว่าผิวซิงกูลาร์ (singular surface) หน้าผลึกรอบๆผิวซิงกูลาร์ เรียกผิววิจินัล (vicinal surface) ผิวหน้าผลึกช่วง p_1 ถึง p_2 เป็นนอนซิงกูลาร์ (nonsingular surface)



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยพื้นที่ ที่หน้าผลึกต่างๆ ใน 3 กรณี[3]

สำหรับการปลูกผลึก เมื่อแบ่งตามสภาพการเกิดผลึกสามารถแบ่งได้ เป็นสองแบบ คือ

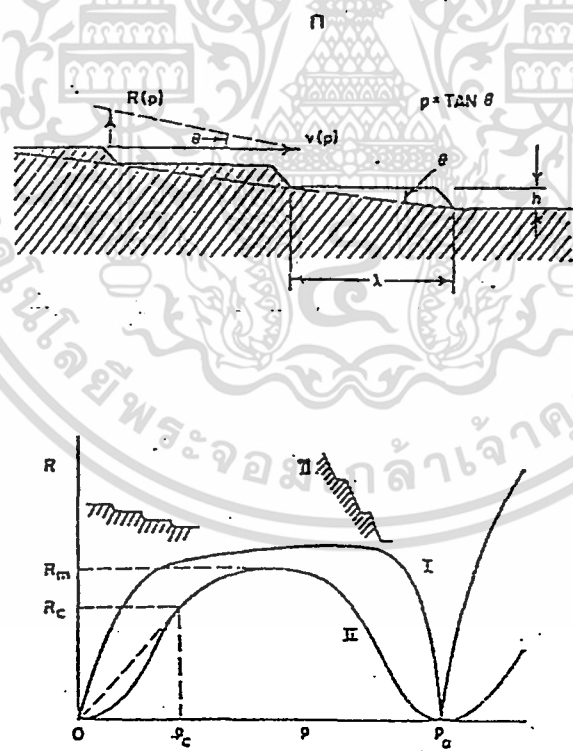
1) ผิวของผลึกที่ปลูกเป็นนอนซิงกูลาร์การเกิดผลึกในชั้นถัดไปจะเกิดได้เลยโดยไม่ต้องมีจุดกำเนิด ซึ่งเรียกว่าเป็นการปลูกผลึกแบบเดนไดรต์ (dendritic growth) การเกิดผลึกแบบนี้จะเกิดในบริเวณการแพร่ที่มีผิวนอนซิงกูลาร์ หรือมีความดันไออิ่มตัวสูงยิ่งยวดมาก ผิวผลึกที่เกิดขึ้นจะไปจับอะตอมเหล่านี้เลย ไม่รอการควบแน่นของอะตอมที่เข้ามาอัตราการปลูกผลึกจึงสูง

2) ผิวของผลึกที่ปลูกเป็นซิงกูลาร์ (และผิววิจินัล) ในการเกิดผลึกแต่ละชั้นต้องมีจุดกำเนิดของชั้นถัดไปด้วย จึงสามารถสร้างผลึกต่อจากจุดกำเนิดนั้น จะเป็นการปลูกผลึกแบบชั้น (layer growth) ซึ่ง อัตราการปลูกผลึกจะช้ากว่าแบบเดนไดรต์ ถ้ามีจุดกำเนิดหนึ่งจุดการเกิดผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะวนรอบจุดกำเนิด ซึ่ง เรียกว่าเป็นการปลูกผลึกแบบวิสเตอร์ (whisker growth) แต่ถ้ามีจุดกำเนิดกระจายสม่ำเสมอผลึกที่เกิดขึ้นจะมีผิวเป็นรูปเหลี่ยมหลายหน้า (regular polyhedron)

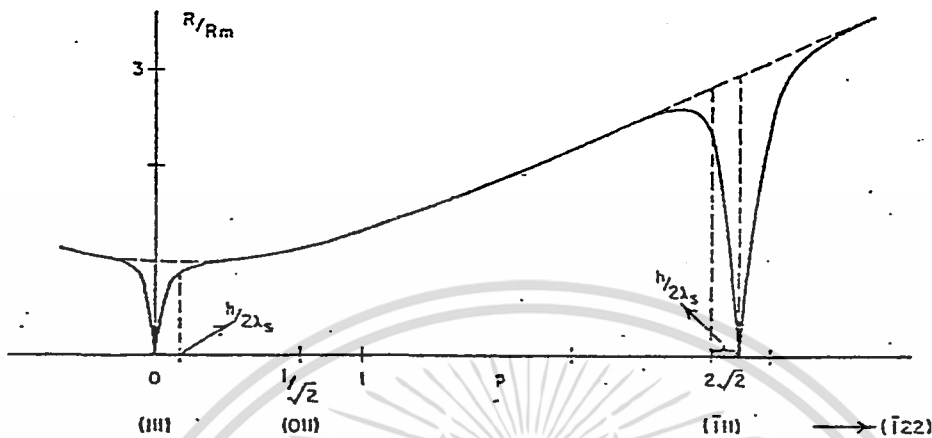
สำหรับผิวผลึกขณะปลูกผลึกที่เวลาใดๆ (t) , $z = z(x,y,t)$ การปลูกผลึกจากภาวะชั่วคราวสู่ภาวะคงตัว ซึ่งโปรไฟล์ของผลึก $z = z_0(x,y)$ และอัตราการปลูกผลึกในแนวนอนกับแกน z ($R = \partial z / \partial t$) จะคงที่ นั่นคือ $z = z_0(x,y) + Rt$ จากรูปที่ 3.9(ก) พิจารณาการปลูกผลึกในสองมิติ ($q = 0$) จะได้ความสัมพันธ์ $R = hv / x = pv$ เมื่อ V เป็นความเร็วของชั้นในแนวนอน จากรูปที่ 3.9(ข) เส้นกราฟ I จะเป็นการปลูกผลึกที่บริสุทธิ์ความเร็วของชั้น $V=R/p$ จะมีค่ามากที่สุดที่ค่า P ค่า แสดงว่าแต่ละชั้นห่างกันมาก และครอบคลุมบริเวณการแพร่มากช่วง R มีค่าน้อย R จะเป็น สัดส่วนกับ p เมื่อ p เพิ่ม R จะเพิ่มจนกระทั่งคงที่ที่ค่ามากที่สุดแล้วลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่ผิวหน้าซึ่งถูกรัดไป เส้นกราฟของรูปที่ 3.9(ข) เป็นกรณีมีสิ่งสกปรกเจือรวมอยู่กับการเคลื่อนของชั้นที่ $p = 0$ ความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ ช่วงที่ค่า p น้อยๆ R จะแปรผกผันกับ p^2 เมื่อสิ่งเจือปนมีน้อยลงค่า p จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.9 (ก) โปรไฟล์ผิวของการปลูกผลึก

(ข) กราฟของอัตราการปลูกผลึกที่หน้าผลึกต่างๆ[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงอัตราการปลูกผลึกเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกที่ผิวหน้าผลึก (110), (011) ถึง(111)[3]

จากรูปที่ 3.10 แสดงว่า R ที่เปลี่ยนไป สำหรับผลึกที่มีโครงสร้างแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face center cubic) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเพียงช่วงสั้น ๆ ที่ R มีค่าแตกต่างไปจากค่า $R_m(1+p)^{1/2}$ จากนิยามของ p , q และ R จะได้ความสัมพันธ์

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right) + \left(\frac{\partial R}{\partial y}\right) = \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right) - \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right) = 0 \quad \text{---(3.2)}$$

สมการนี้เป็นผลจากกฎการอนุรักษ์ชั้นของชั้นโมเลกุล ใช้เป็นสมการหลักในการหาผลเฉลยของปัญหาในภาวะชั่วคราว จะเห็นชัดเจนเมื่อพิจารณาใน 2 มิติ ($q=0$) โดย p/h เป็นความหนาแน่นของชั้นและ R/h เป็นการไหลของชั้นผ่านจุดบนผิวต่อหน่วยเวลาสภาพภายนอกคงที่จะสมมติให้ห่างสารตั้งต้นมากค่า R จะขึ้นกับ p และ q เท่านั้น ส่วนความสัมพันธ์ $R(p,q)$ จะเหมือนกับสภาวะคงตัวดังนั้นจากสมการ (3.2) สามารถหาสมการอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งได้สองสมการดังนี้

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial R}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial R \partial p}{\partial p \partial x} + \frac{\partial R \partial p}{\partial q \partial y} = 0 \quad \text{---(3.3)}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial R \partial q}{\partial p \partial x} + \frac{\partial R \partial q}{\partial q \partial y} = 0 \quad \text{---(3.4)}$$

ซึ่งสามารถคำนวณหา $p(x,y,t)$, $q(x,y,t)$, R ผลึกจริง $z = z(x,y,t)$ ได้ ในกรณีของมิติมีแต่ความชัน p สมการ (3.2) จึงเป็น $\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right) + c \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) = 0$ เมื่อ $c = \frac{\partial R}{\partial t}$ จะได้ผลเฉลยในด้านการคำนวณ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

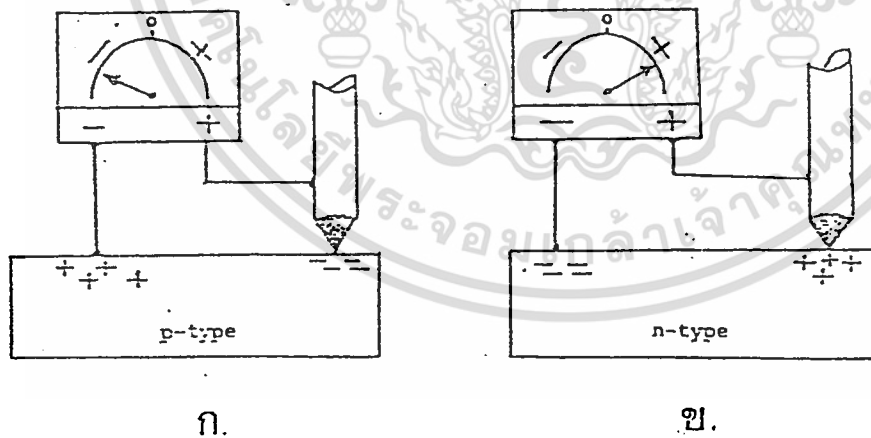
บทที่ 4

ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

ในการศึกษาความนำไฟฟ้าของผลึก CdS ของโครงงานนี้ จะทำให้ทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของพาหะและสภาพความต้านของผลึก เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีขนาดเล็กจึงต้องใช้วิธีวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์

4.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน[5]

วิธีขั้วความร้อนเป็นวิธีที่ง่ายสะดวกและรวดเร็ว ในการตรวจสอบสารกึ่งตัวนำว่ามีสมบัติเป็นชนิดเอ็น หรือ พี โดยนำผลึก CdS ที่ต้องการตรวจสอบวางไว้บนแผ่น อลูมิเนียม ขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับแผ่นโลหะส่วนขั้วบวกต่อกับหัวแร้ง ถ้าโวลต์มิเตอร์เป็นบวกแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น .เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะวิ่งจากลบไปบวก ถ้าเป็นลบแสดงว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีเนื่องจาก โฮลวิ่งจากบวกไปลบ



รูปที่ 4.1 แสดงการตรวจสอบชนิดสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

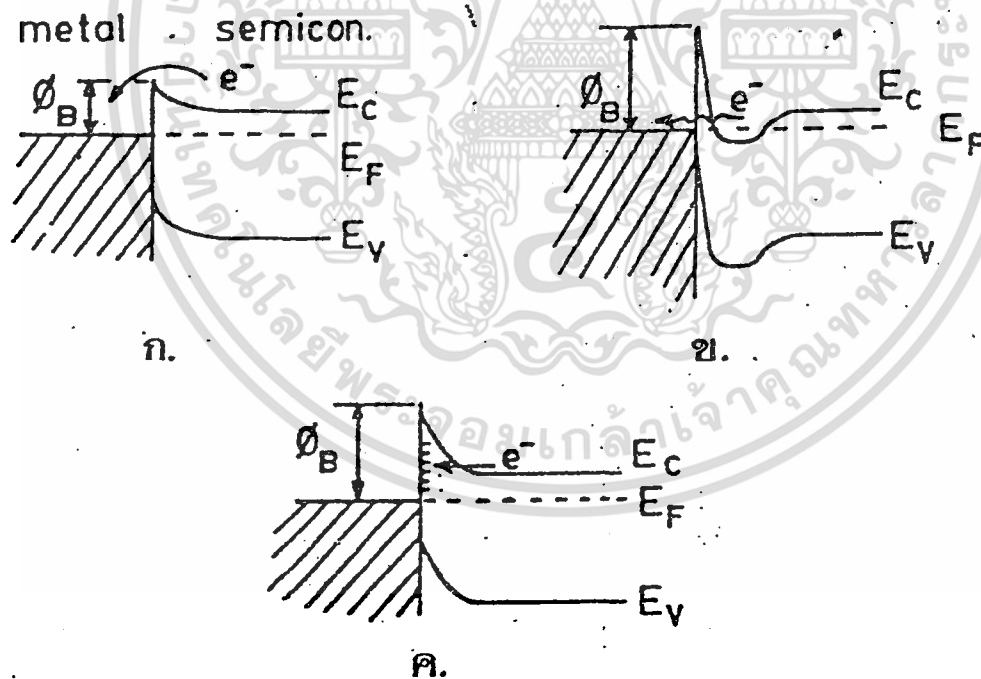
4.2 จุดสัมผัสไอห์มิก[3]

จุดสัมผัสไอห์มิกหมายถึงจุดสัมผัสที่ไม่เกิดกระแส และมีความสัมพันธ์ระหว่าง I-V เป็นเส้นตรงทั้งสองข้าง ในทางปฏิบัติจะพิจารณาว่าเป็นจุดสัมผัสไอห์มิกเพียงถ้ามีความต่างศักย์ตกคร่อมจุดสัมผัสน้อยกว่าตกคร่อมสารอยู่มากๆ ซึ่งจะไม่รบกวนการวัดสมบัติของสารมี 3 วิธีหลักที่ทำให้เกิดจุดสัมผัสไอห์มิกคือ

1) การเลือกชนิดของโลหะทำให้เกิดค่าแฟงศักย์ ระหว่างจุดสัมผัสน้อยเพียงพอสำหรับกระแสที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ให้ค่า work function ของโลหะน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำ ($\phi_M < \phi_S$) และในสารชนิด p ให้ ($\phi_M > \phi_S$) ดังรูปที่ 4.1

2) โดยการเติมสารเจือกึ่งตัวนำอย่างหนัก (heavily dope) ที่บริเวณรอยต่อ (n^+, p^+) เพื่อให้มีการนำกระแสจากขบวนการ ลอดผ่านกำแพงศักย์ (tunneling)

3) โดยการทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัว (recombination) ในสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อเป็นจำนวนมากศูนย์กลางการรวมตัวนี้อาจเกิดจากความเสียหายของผิว (เช่นการขีดผิวด้วยกระดาษทราย)



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงจุดสัมผัสแบบไอห์มิก[3]

(ก) จุดสัมผัสที่กำแพงศักย์มีค่าต่ำ

(ข) จุดสัมผัสที่เกิดจากการสารเจืออย่างหนักด้วยโลหะที่ทำขั้วไฟฟ้า

(ค) จุดสัมผัสที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับ โฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุสภาพจุดสัมผัสโอห์มมิกที่ดีกว่า การสังเกตการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงของความสัมพันธ์ I-V คือหาความต้านทานที่จุดสัมผัส พิจารณากระแสที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยต่อ MS สูง B ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง (M→S หรือ S→M) ที่สมมูลย์อุณหภูมิ T ในเทอมกระแส Richardson ในสมการ (4.1)

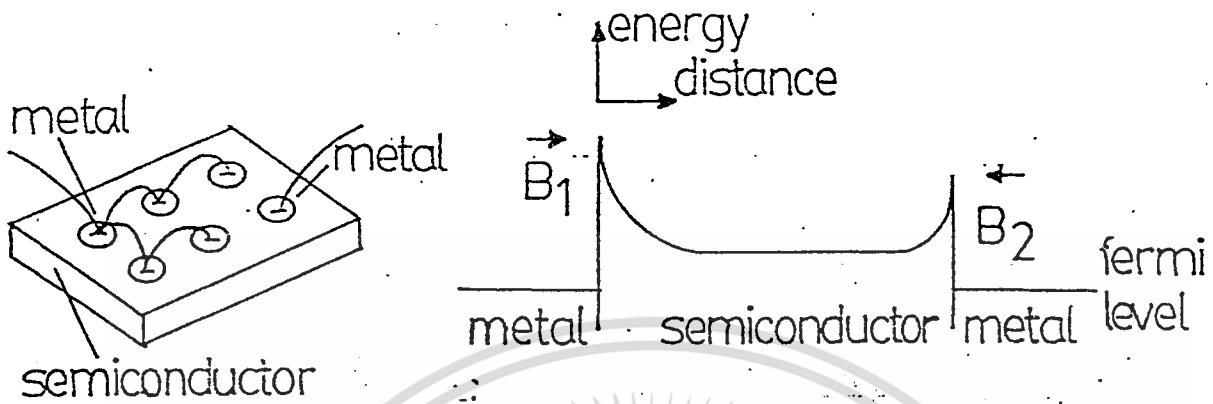
$$I_0 = aA^* T^2 \exp(-\Phi_b/kT) \quad \text{-----(4.1)}$$

เมื่อ a เป็นพื้นที่ของจุดต่อ

Φ_b เป็นความสูงของกำแพงศักย์

A^* เป็นค่าคงที่ Richardson ($A^* = 4\pi m_e k^2/h^3$)

กระแส (I) จะไหลผ่านจุดสัมผัสโลหะหนึ่ง (a_1, B_1) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำที่มีความต้านทาน R และออกทางจุดสัมผัสโลหะอีกจุดหนึ่ง (a_2, B_2) ดังในรูปที่ 4.19 ให้ V และ V_R เป็นความต่างศักย์คร่อมจุดสัมผัสทั้งสอง และคร่อมสารกึ่งตัวนำ และให้กระแส $I = V_R/R$ ถ้า $I < I_{B2}$ แล้วกระแสในสถานะสมมูลย์ของจุดสัมผัสทั้งสองทิศทางจะมากเพียงพอสำหรับ I ที่ไหลผ่านระบบ จึงไม่มีความต่างศักย์คร่อมจุดสัมผัส ($V_R = V$) นั่นคือความต่างศักย์คร่อมทั้งสองทิศทาง (V_1, V_2 เมื่อ 1 และ 2 ต่อกลับขั้วลบ) เท่ากัน ($V_1 = V_2$) พิจารณาให้ $I_{B1} < I_{B2}$ นั่นคือกรณีที่ $B_1 > B_2$ เมื่อ $a_1 = a_2$ หรือในกรณีที่ $a_1 < a_2$ เมื่อ $B_1 = B_2$ ถ้า $I_{B2} > I > I_{B1}$ จะได้ $V_2 = V_R$ เพราะ $I_{(M-S)2} < I_{B2}$ และกำแพงศักย์ด้านสารกึ่งตัวนำสูง ซึ่งทำให้ไม่มีความต่างศักย์คร่อมที่จุดที่ 1 (ถึงแม้ว่า $I_{(S-M)1} > I_{B1}$) แต่จะได้ $V_1 > V_R$ เพราะกำแพงศักย์ด้านโลหะสูงชัน เมื่อ $I_{(M-S)1} > I_{B1}$ จึงเกิดความต่างศักย์คร่อมที่จุดสัมผัสที่ 1 ดังนั้นที่อุณหภูมิคงที่เมื่อเพิ่มกระแสจน $I_{B2} > I > I_{B1}$ จะได้ $V_1 > V_2$ หรือเมื่อให้กระแส I คงที่แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิ (I_0 เปลี่ยน) การแยกกันของความต่างศักย์จะแยกกันโดยเงื่อนไขเหมือนกัน กระแส I_0 ที่อุณหภูมิเริ่มแยก (T_S) จะเท่ากับกระแสริชาร์ดสัน (Richardson) ที่กำแพงศักย์สูง (I_{B1}) การทดลองที่กระแสหลายค่าจะได้ข้อมูลระหว่าง I_b และ T หลายค่า จากความสัมพันธ์ของกระแสริชาร์ดสัน กับอุณหภูมิดังสมการ (4.1) ดังนั้นความชันของกราฟ $\log(I/T^2)$ กับ $(1/T)$ ทำให้สามารถหาความสูงของกำแพงศักย์ได้



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพสิ่งประดิษฐ์ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ และแสดงระดับพลังงานของสิ่งประดิษฐ์ [3]

4.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์[5]

หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติทางผลึกวิทยาแล้ว ทำให้ทราบว่าสารที่เตรียมไว้บริสุทธิ์หรือไม่ แต่ยังไม่ทราบถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างแต่ละตัว ดังนั้นวิธีพื้นฐานแรกที่จะตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าคือ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่หลายวิธีแต่ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับโครงการนี้ เนื่องจากสารตัวอย่างมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ในการทดลองจะมีรายละเอียดดังนี้

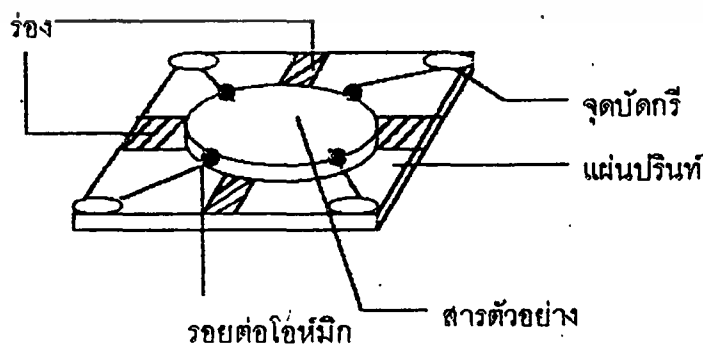
4.3.1 การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในการเตรียมผลึก CdS ที่ปลูกได้เพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ดังนี้

1. ขัดผิวหน้าผลึก CdS ที่ปลูกได้ไม่มีความหนาของชั้นสารสม่ำเสมอ
2. ทำความสะอาดผิวหน้าผลึก CdS ให้สะอาด ซึ่งขั้นตอน (1) และ (2) จะ

อธิบายไว้ใน การทดลอง

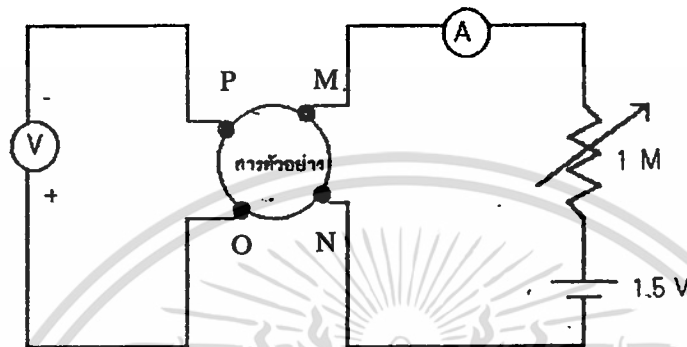


รูปที่ 4.4 แสดงผลึก CdS ที่ผ่านการขัดผิวหน้าผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบสาร

1. นำอุปกรณ์ที่เตรียมไว้มาต่อวงจรดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

2. ป้อนกระแสให้แก่สารตัวอย่าง ผลึก CdS บริสุทธิ์หลาย ๆ ค่าที่จุด MN แล้วอ่านค่าความต่างศักย์ที่จุด OP ที่ค่ากระแสนั้น ๆ บันทึกค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้
3. เปลี่ยนจุดป้อนกระแสเป็นจุด NO โดยป้อนกระแสหลาย ๆ ค่า อ่านค่าความต่างศักย์ที่จุด PM ที่ค่ากระแสนั้น ๆ บันทึกค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้

4.3.2 การคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.4 สามารถนำไปสู่การหาค่าความต้านทานได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ดังนี้

$$R_{MN,OP} = V_{OP}/I_{MN} \quad \text{-----(4.2)}$$

$$R_{NO,PM} = V_{PM}/I_{NO} \quad \text{-----(4.3)}$$

จากสมการ (4.1) , (4.2) จะได้

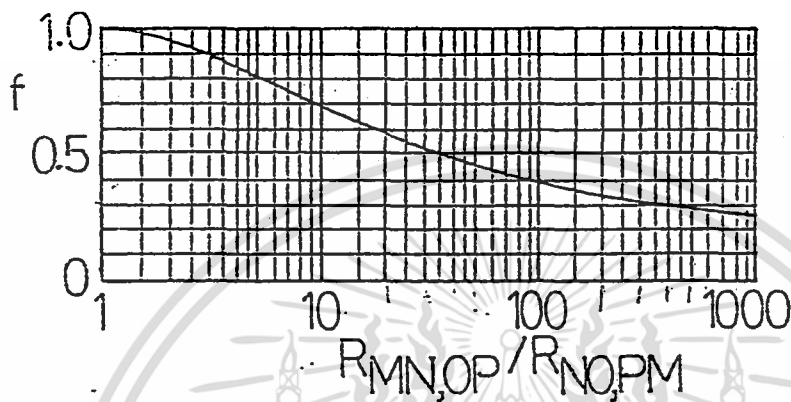
$$\exp[(-\pi d/\rho)R_{MN,OP}] + \exp(-\pi d/\rho)R_{NO,PM} = 1 \quad \text{-----(4.4)}$$

หรือเขียนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \pi d / \ln 2 [(R_{MN,OP} + R_{NO,PM}) / 2] f (R_{MN,OP} / R_{NO,PM}) \quad \text{-----(4.5)}$$

ค่า $f(R_{MN,OP} / R_{NO,PM})$ เป็นฟังก์ชันค่าแก้มซึ่งแสดงดังรูปกราฟที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เป็นฟังก์ชันค่าแก้ม f ในการหาสภาพต้านทานไฟฟ้าคววรีแวนเดอร์เพอร์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิธีการทดลอง และผลการทดลอง

หลักสำคัญในการทดลอง ต้องเริ่มจากการดำเนินงานสร้างเตาไฟฟ้าโซลิดเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดที่ให้ความร้อนพันรอบเป็นแกนทรงกระบอก โดยมีปูนทนความร้อนอัดแทรกระหว่างขดลวดเพื่อใช้เป็นฉนวนไม่ให้ขดลวดแต่ละกันเกิดลัดวงจรขึ้นมา ซึ่งเตาชนิดนี้เป็นเตาในแนวอนสร้างขึ้นมาเพื่อจุดประสงค์ในการปลูกผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

ในโครงการจะเริ่มต้นจากการหาและศึกษาข้อมูลของการสร้างเตาไฟฟ้าโซลิดเชื้อเพลิงและอุปกรณ์เดือนเตาทางกลศาสตร์ ตลอดจนการปลูกผลึกและนำผลึกที่ปลูกได้ไปศึกษาถึงคุณสมบัติซึ่งในรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทต่อไป

5.1 การออกแบบและการสร้างเตาไฟฟ้าโซลิดเชื้อเพลิง

5.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา

1. ลวดแกนตัด A1 (Kantal A1) มีความต้านทาน 0.4 โอห์ม/เซนติเมตร[8] มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร ใช้ความยาว 120 เซนติเมตร
2. ปูนทนไฟมีชื่อทางการค้าว่า ปูนทนไฟ 30 เอเอ็ม ชนิดผสมสำเร็จพร้อมนำออกมาใช้งาน
3. เซรามิกส์ไฟเบอร์ชนิดแผ่น (blanket) ขนาด 7,200 x 600 x 25 มิลลิเมตร³ ของบริษัท Isolite Eastern Union REF.Co.LTD
4. ท่อ พีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร แผ่นพลาสติก และน้ำมันหล่อลื่นเพื่อใช้ทำท่อเตา
5. ลวดตาข่าย ใช้ทำโครงผนังด้านหน้าและหลังเตา
6. อลูมิเนียม ชนิดแผ่นหนา 0.125 เซนติเมตร ใช้ทำผนังเตา
7. รางและล้อ

5.1.2 การสร้างเตา

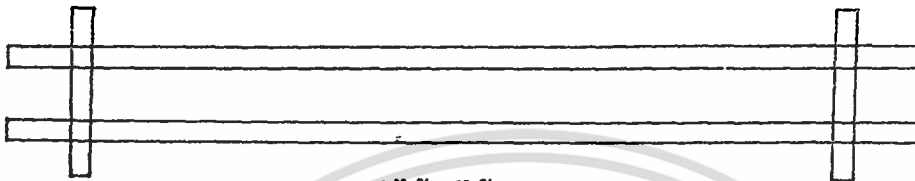
1. นำท่อพีวีซีมาผ่าแบ่งครึ่งตามความยาวท่อ นำไม้ขนาด 2 x 120 เซนติเมตร² และขนาด 2 x 1 เซนติเมตร² มาวางระหว่างท่อพีวีซีดังรูปที่ 5.1 เพื่อทำเป็นแบบในการหล่อปูนยึดลวด แกนตัดแล้วตอกตะปูยึดแผ่นไม้ไว้และยึดหัว - ท้ายท่อพีวีซี ให้แน่นใช้พลาสติกพันรอบท่อหน้า ไม้หล่อลื่นลงบนพลาสติกป้องกันปูนติดกับท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5.0 cm

ท่อ PVC



นำไม้วางไว้กลางท่อ

50 cm

รูปที่ 5.1 (ก)



รูปที่ 5.1 (ข)

รูปที่ 5.1 แสดงการหล่อท่อปูน และการพันพันขดลวด

(ก) แสดงแบบในการหล่อท่อปูน

(ข) แสดงการพันขดลวด

2. พันขดลวดรอบท่อพีวีซี

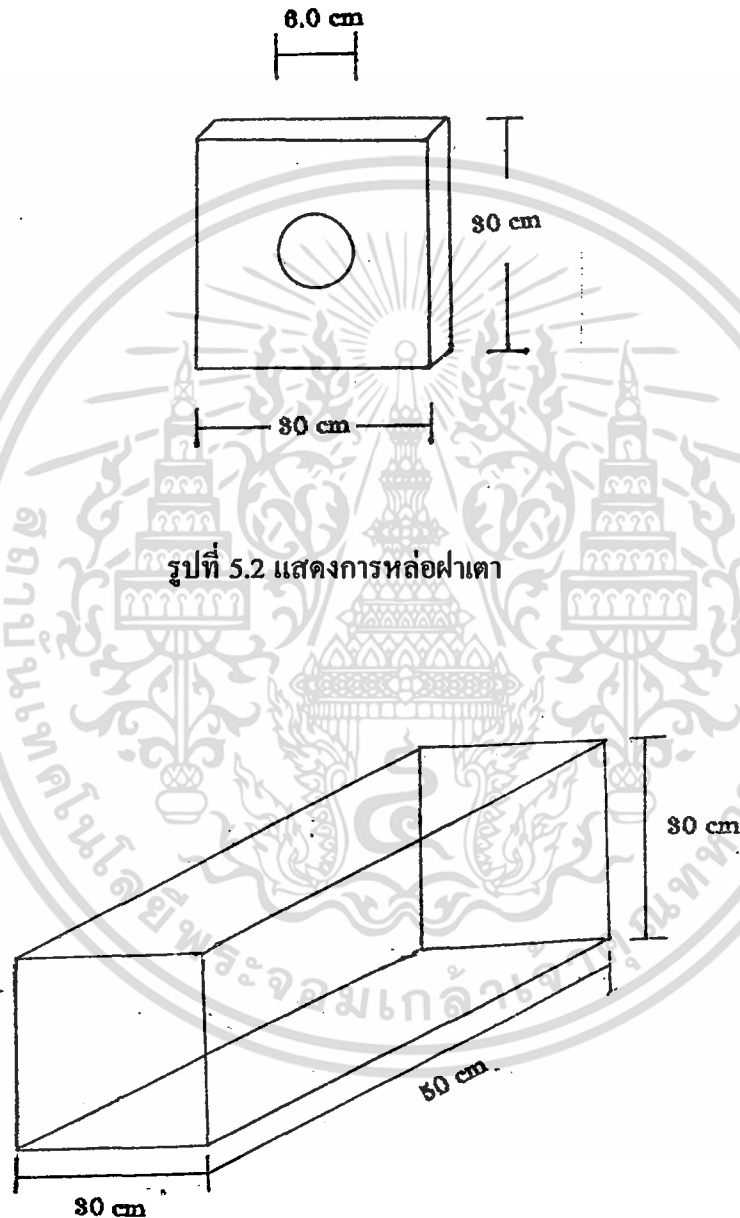
3. นำปูนมาทาห้รอบขดลวดที่พันไว้ ปรมน้ำเมื่อทาปูนเสร็จจะระวังอย่าให้ขดลวดชิดกัน โดยให้ปูนอยู่ระหว่างขดลวด

4. รอจนปูนแห้ง ถอดไม้ออกจากกลางท่อพีวีซี แล้วค่อยแกะท่อเบาๆ ดึงเอาท่อพีวีซีออกมาพร้อมกับพลาสติก

5. ทำแบบหล่อฝาเตาขนาดเท่ากับ 30 x 30 เซนติเมตร² โดยตีกรอบไม้ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร² ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นพื้นรองดังรูปที่ 5.2 ฉาบปูนลงไปโดยตรงกลางฝาเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร. วัสดุสำหรับวางพาดท่อเตา ใช้ลวดตาข่ายวางเป็นโครงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแล้วฉาบปูนทับอีกครั้ง พรมน้ำให้ชุ่ม วางทิ้งไว้ให้แห้ง



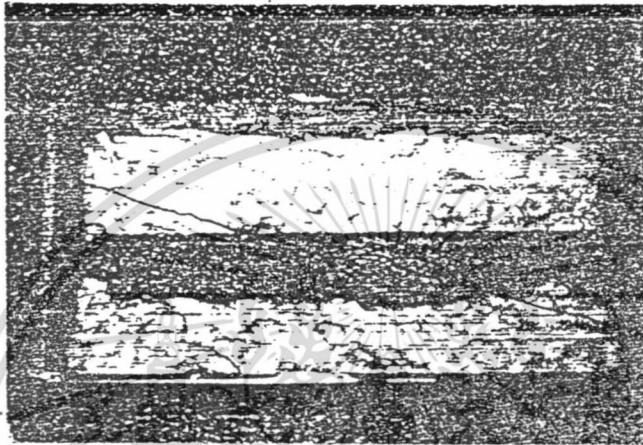
รูปที่ 5.2 แสดงการหล่อฝาเตา

รูปที่ 5.3 ลักษณะภายนอกของเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. พับกล่องอลูมิเนียม ขนาด 30 x 30 x 40 เซนติเมตร³ มี 4 ด้าน ดังรูปที่ 5.3

7. ประกอบเตาโดยช่องว่างในเตาทั้งหมด ใช้เซรามิกไฟเบอร์ปูอัดให้แน่นพอ
ประมาณดังรูปที่ 5.4

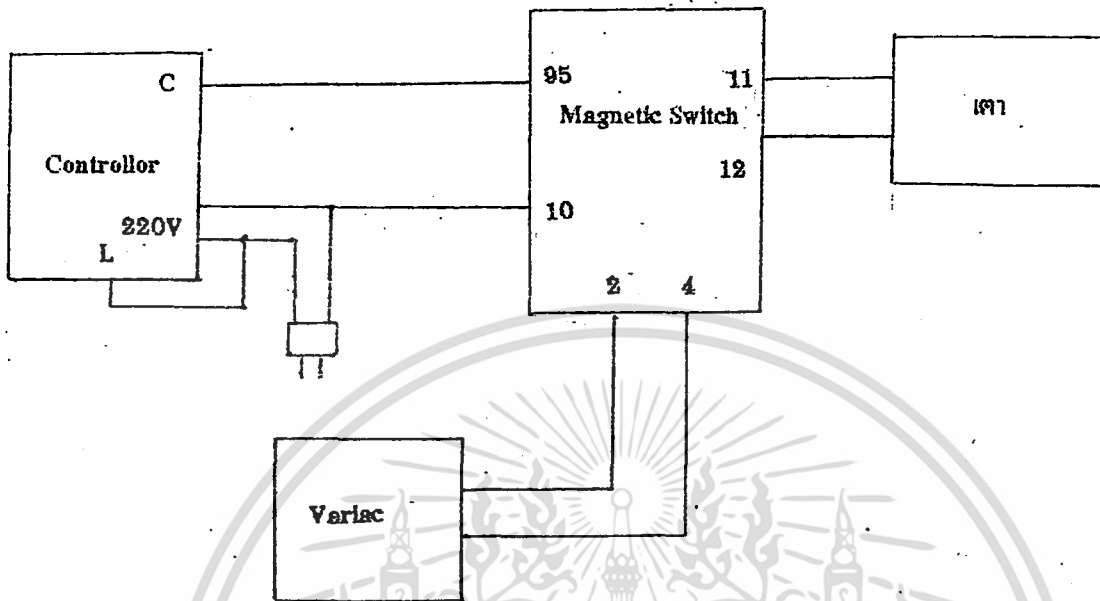


รูปที่ 5.4 แสดงการวางแผ่นเซรามิกไฟเบอร์

ปูนซีเมนต์ที่นำมาหล่อเตาเมื่อแห้งจะทำการหดตัว ทำให้ต้องหมั่นพรมน้ำและยา
ปูนตรรอยร้าวที่เกิดจากการหดตัวบ่อยๆ

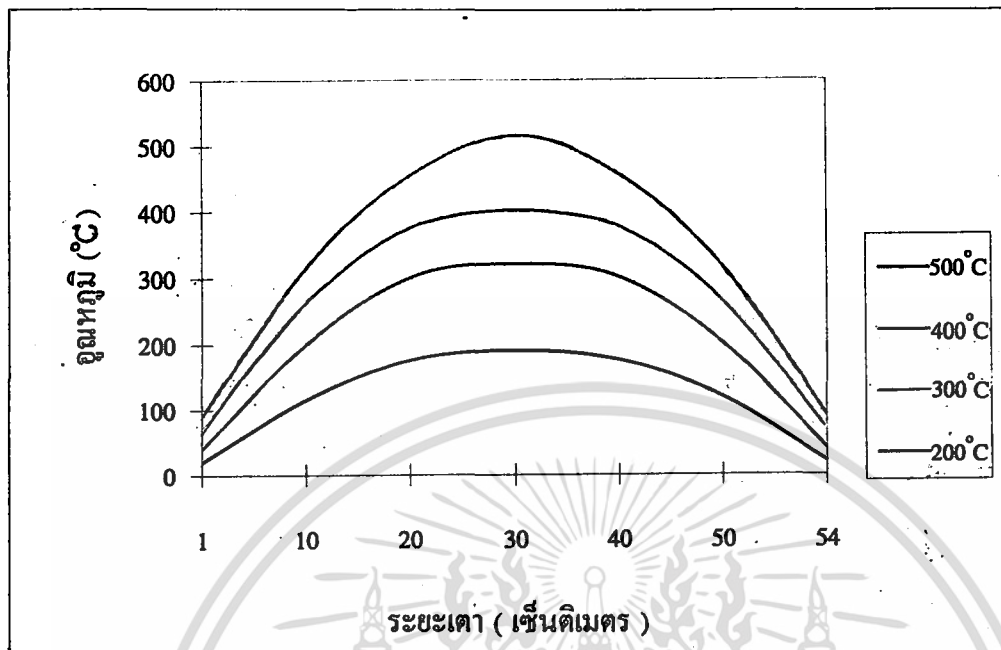
5.2 การโปรไฟต์เตา

หลังจากการสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดียวเสร็จแล้ว ต้องทำการโปรไฟต์เตาหาระดับอุณหภูมิ
ตามระยะทางของท่อขดลวดแคนดัลของเตาในการศึกษาหาข้อมูลของอุณหภูมิจะเป็นไปดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงวงจรควบคุมอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิทำงานร่วมกับ แมกเนติก-รีเลย์ ทำงานร่วมกับแมกเนติกนิติก-รีเลย์ จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์คอยควบคุม (ปิด - เปิด) กระแสที่ได้รับจาก วาริแอก นั่นก็คือถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าตัวควบคุมอุณหภูมิกำหนด แมกเนติก-รีเลย์ จะเปิดให้กระแส จากวาริแอกไหลผ่าน โหลดขดลวดแคนดัลทำให้ขดลวดร้อน ถ้าอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ แมกเนติก-รีเลย์จะปิดกระแสหยุดไหล ในการควบคุมอุณหภูมิจะทำที่กลาง เตาซึ่งเป็นตำแหน่งที่ขดลวดแคนดัลพันรอบท่อใกล้กันมากที่สุด และมีเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อขดลวดแคนดัลในการให้ความร้อนแก่เตาไฟฟ้าต้องคำนึงถึงค่าโวลต์เตจ ของวาริแอกและความร้อนที่สูญเสียให้แก่สภาวะแวดล้อมด้วยดังนั้นในการโปรไฟล์เตาไฟฟ้าเราจะ ใช้ค่าโวลต์เตจจากวาริแอก และเปรียบเทียบหาค่าอุณหภูมิได้ดังนี้



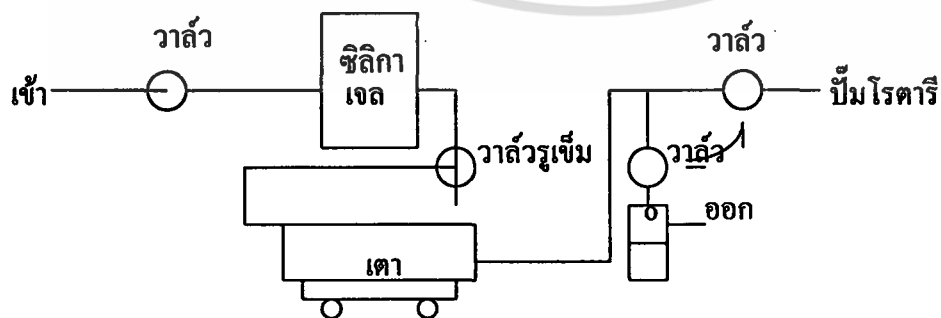
รูปที่ 5.6 แสดงอุณหภูมิโปรไฟล์ตามระยะของเตา

เทอร์โมคัปเปิลมี 2 ตัว คือใช้ควบคุมอุณหภูมิ และอีกตัวใช้วัดอุณหภูมิ

5.3 การติดตั้งระบบ

5.3.1 ระบบไหลแก๊ซอาร์กอน

ในการติดตั้งระบบจะเกี่ยวข้องกับการไหลแก๊ซอาร์กอน (Ar) ผ่านเตาไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นตัวพา CdS ที่ระเหิดกลายเป็นไอไปตกผลึก ซึ่งระบบนี้จะเป็นระบบเปิดด้านหนึ่งและปิดด้านหนึ่งที่สภาวะความดันปกติ แต่สภาวะการปลูกผลึกจะอยู่ภายใต้บรรยากาศของแก๊ซอาร์กอน



รูปที่ 5.7 แสดงระบบของการไหลของแก๊ซอาร์กอน

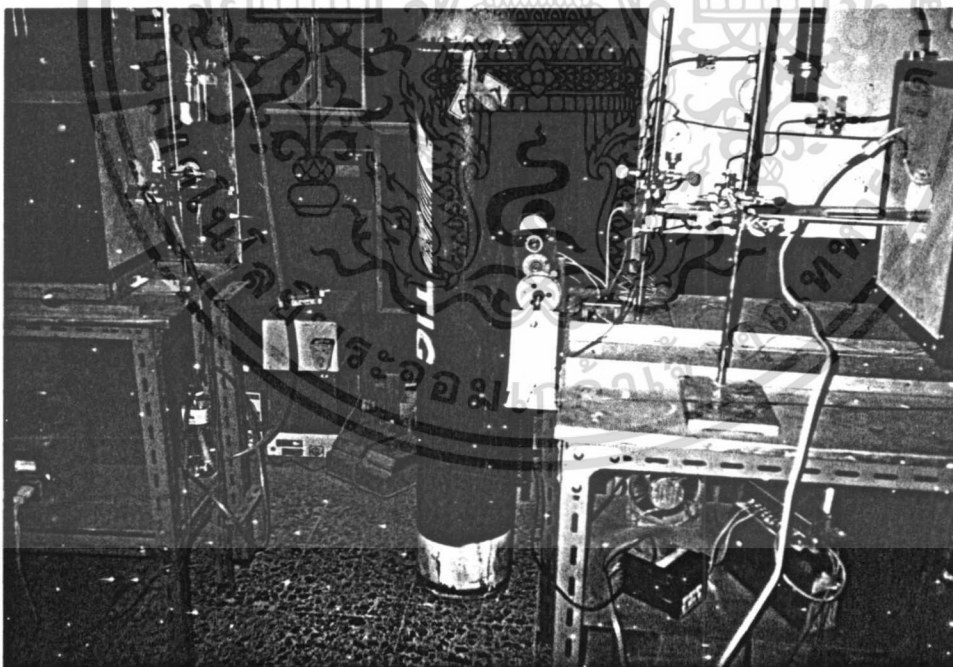
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปให้แก๊ซอาร์กอนผ่านซิลิกาเจลเพื่อดูดความชื้นออกแล้วผ่านเตา เมื่อแก๊ซอาร์กอนออกมาจากเตาเราสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ หรือผ่านน้ำมันแล้วปล่อยทิ้งไป

5.3.2 ระบบการเลื่อนเตา

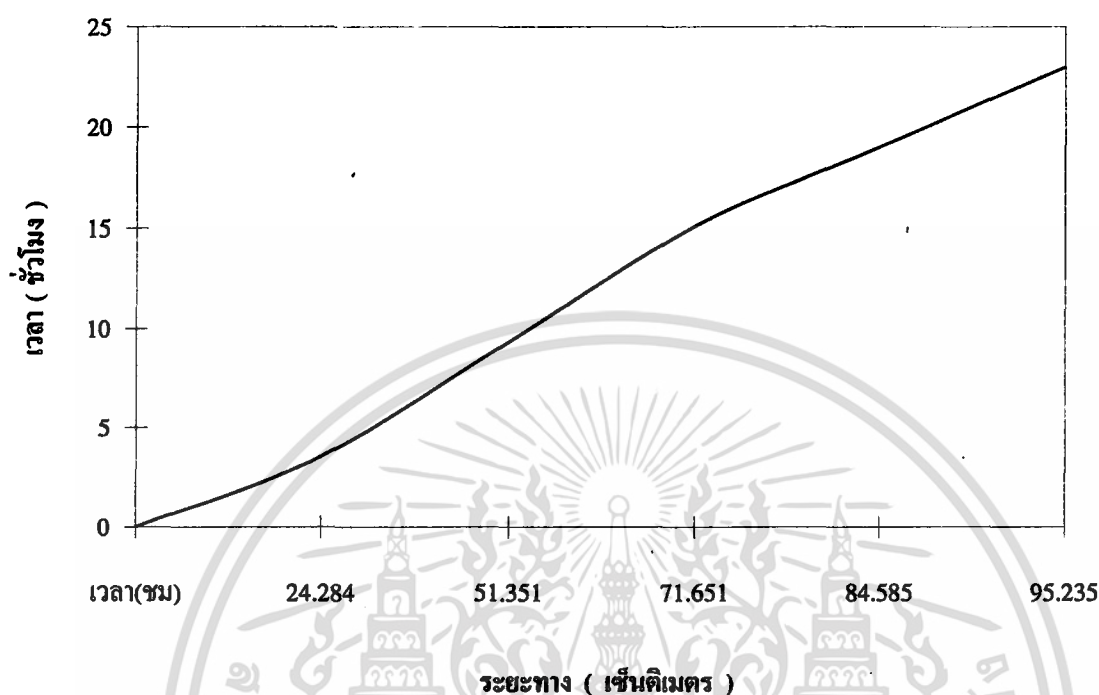
เนื่องจากการปลูกผลึกต้องใช้ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง $1100 - 1150^{\circ}\text{C}$ และ อุณหภูมิภายในห้องคลวคเคนต์จะกระจายตามระยะทาง ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ ใช้วิธีเลื่อนเตาเพื่อให้สารและผลึกแคลเซียมซิลไฟด์ผ่านอุณหภูมิในช่วงที่ต้องการ โดยการใช้ เฟืองช่วยดึงเตาไฟฟ้า ซึ่งเราจะติดตั้งเลื่อนใต้เตาเพื่อใช้สำหรับเลื่อนเตาไปบนรางอลูมิเนียม

ในการดึงเพื่อเลื่อนเตาไฟฟ้าใช้มอเตอร์มีความเร็วรอบ $1/60$ นาที เป็นตัวขับเฟืองเพื่อดึงเตาไฟฟ้าให้เลื่อนตามรางอลูมิเนียมด้วยความเร็วตามที่ต้องการ ในโครงการนี้ ความเร็วกำหนดไว้คือ 1.9 มิลลิเมตร / ชั่วโมง แต่ในความเป็นจริงความเร็วในการเลื่อนเตาจะขึ้นกับแรงดึงเชือกอันเนื่องมาจากมวลของเตาด้วย



รูปที่ 5.8 แสดงรูปอุปกรณ์ในการเลื่อนเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าระหว่างระยะทางในการเลื่อนเตากับเวลา

5.4 ขั้นตอนการปลูกผลึกโดยวิธี PVD (Physical vapor deposition)[3]

สารประกอบ CdS มีสถานะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงถึง 1720°C ดังนั้นเมื่อทำการปลูกผลึกจากสถานะหลอมเหลวต้องใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกมีจุดอ่อนตัว (softening point) 1683°C จุดแอนนิล (annealing point) 1210°C และจุดเครียด (strain point) 1120°C ทำให้ปลูกผลึก CdS ที่อุณหภูมิสูงได้ยากและผลึกที่ปลูกในอุณหภูมิต่ำจะมีความสมบูรณ์สูงในงานโครงการนี้จึงได้ทำการปลูกผลึก CdS จากสถานะไอในบรรยากาศแก๊ส Ar ที่อุณหภูมิ $1100 - 1200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสารตั้งต้นเป็นผลึกที่มีโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ที่สังเคราะห์แล้วมีความบริสุทธิ์ 99.999 % วิธีการปลูกผลึกในการทดลองนี้ได้พัฒนาขึ้นจากวิธีของ Piper และ Poilch[2] โดยที่ทำการไหลของแก๊ซอาร์กอนเพียงอย่างเดียวจะไม่มีแก๊ซ H_2S เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่มีสารประกอบออกไซด์กลายเป็น H_2O ออกไปพร้อมกับแก๊ซที่ไหลเข้ามา

5.4.1 วิธีเตรียมระบบในการปลูกผลึก CdS

1) ระบบการปลูกผลึก CdS ในขดลวดความร้อนภายในเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยจะอยู่ภายในแก๊วควอทซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.3 เซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร

2) ท่อควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกโดยปลายด้านหนึ่งเป็นรูปกรวยแหลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร และปลายแหลมมีควอทซ์แท่งเล็กยื่นออกมาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร

3) ท่อควอทซ์ปลายปิด 1 ด้าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ใช้ปิดกั้นสารตั้งต้น

4) เป็นตำแหน่งของสารตั้งต้นแบบผงแป้ง (powder)

5) เป็นบริเวณที่จะปลูกผลึก

6) ขดลวดความร้อนแคนดัล A1

7) ระบบการไหลของแก๊ส (ในหัวข้อ 3.2.1)

8) ระบบการเลื่อนเตา (ในหัวข้อ 5.3.2)

9) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (ในหัวข้อ 5.2)

สำหรับแก้วควอทซ์มีการทำความสะอาดดังนี้

- ล้างท่อควอทซ์ด้วยผงซักฟอกให้สะอาด

- แช่ในสารละลายของกรดมีส่วนผสม HCl : HNO₃ : DI (DI water) ในอัตรา 3:1:10 เป็นเวลา 30 นาที

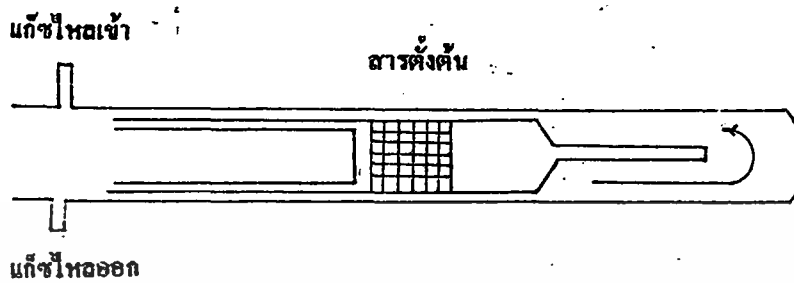
- แช่ในน้ำ DI เป็นเวลา 30 นาที

- นำมาอบให้แห้ง

นำการติดตั้งระบบให้พร้อมสำหรับการปลูกผลึก CdS ทำการตรวจบริเวณโอริง (oring) และรอยต่อของบริเวณระบบไหลแก๊ซอาร์กอนว่ามีการรั่วไหลของแก๊ซอาร์กอนหรือทดสอบได้โดยใช้ฟองสบู่หยดลงบนรอยต่อขณะทำการไหลแก๊ซอาร์กอนผ่านระบบถ้าตรวจพบว่ามีฟองสบู่เกิดเป็นฟอง (bubble) ออกมา แสดงว่าเกิดการรั่วต้องทำการแก้ไขโดยทำให้รอยต่อนี้แน่นยิ่งขึ้น

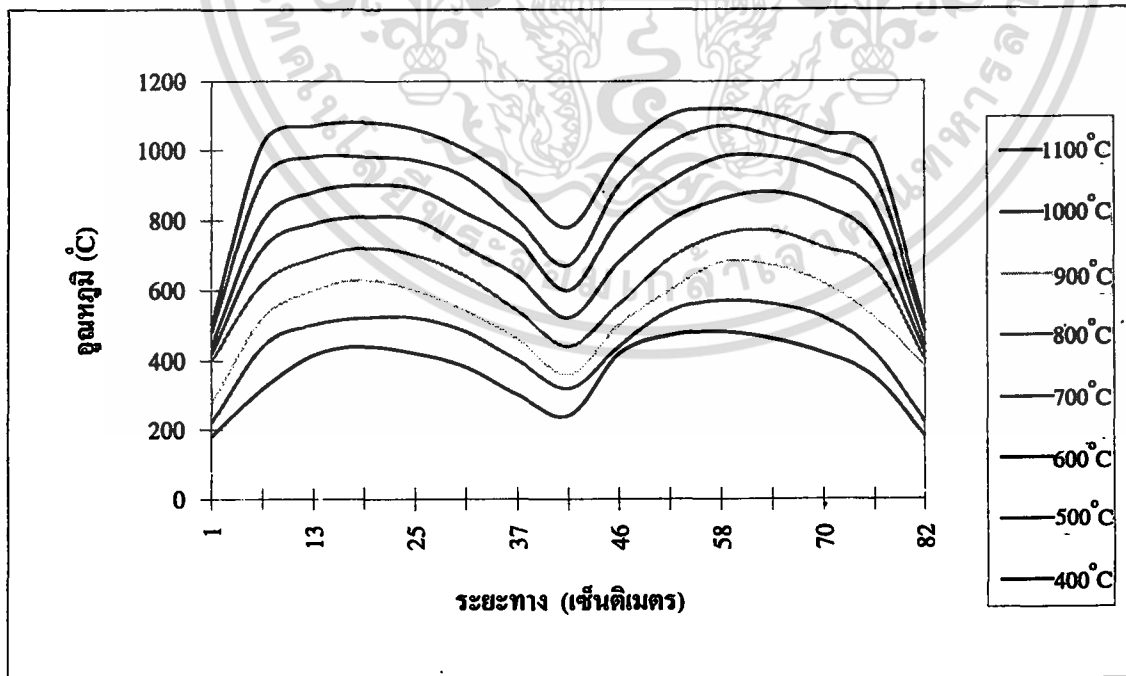
5.4.2 วิธีปลูกผลึก CdS จากสถานะไอ

วิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นมาจากหลักการของ Piper และ Polish โดยที่จะไม่มีการไหลของแก๊ซ H₂ เข้าไปทำปฏิกิริยากับ CdO เพื่อดึงเอาออกไซด์ออกมาในรูป H₂O ทำให้สารตั้งต้นบริสุทธิ์ขึ้น ท่อควอทซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกปลายด้านหนึ่งทำเป็นรูปกรวยเป็นมุม 30 องศาเพื่อควบคุมให้เกิดนิวเคลียสที่ปลายแหลมและมีท่อควอทซ์ขนาดเล็กต่อจากปลายแหลมเพื่อช่วยระบายความร้อนของผลึกที่ปลูก ส่วนปลายอีกด้านจะมีควอทซ์ปลายปิดสอดเข้าพอดี เป็นตัวปิดกั้นสารตั้งต้น เมื่อเกิดการระเหิดของสารตั้งต้นจะมีไอหนีออกมาทางด้านนี้ เนื่องจากท่อควอทซ์นี้ยาวพอที่จะทำให้ไอที่รั่วออกมาเย็นตัวก็จะแข็งตัวปิดทำให้ระบบปิด



รูปที่ 5.10 แสดงท่อควอทซ์ของการปลูกผลึก

ในการวางสารตั้งต้น CdS แบบผ่งแป่งวางห่างจากจุดปลายกรวยแหลมเป็นระยะ 3.5 เซ็นติเมตร ทั้งนี้ควอทซ์ที่ใช้ปลูกผลึกต้องมีความสะอาดมากและผิวภายในเรียบโดยเฉพาะปลายกรวยแหลม เนื่องจากผิวที่ขรุขระและสิ่งสกปรกจะกลายเป็นนิวเคลียสของการเกิดผลึก CdS ทำให้ได้ผลึกหลายเกรน ภายในท่อควอทซ์มีเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่กลางเตา เตาที่ใช้ในการปลูกผลึกครั้งนี้เป็นเตาไฟฟ้า 2 โชน โดยเลือกใช้โชนหลังเนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิโปรไฟล์เหมาะสำหรับการปลูกผลึกลักษณะการโปรไฟล์อุณหภูมิของเตาเป็นดังรูปกราฟที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการโปรไฟล์อุณหภูมิของเตา 2 โชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟโปรไฟล์อุณหภูมิเตา เลือกระยะทางที่ 64 เซ็นติเมตร เป็นตำแหน่งวางสารตั้งต้น Cds

5.4.2.1 ลำดับขั้นตอนในการปลูกผลึก

1. เปิดวาล์วที่ถังก๊าซอาร์กอน และเปิดวาล์วละเอียดแล้วทำการเปิดวาล์วที่ระบบการไหลแก๊สเริ่มจากการที่วาล์วแรกปล่อยให้แก๊สไหลผ่านซิลิกาเจลที่ความดันไม่เกิน 5 ปอนด์/ตารางนิ้ว เพื่อดูความขึ้นของแก๊สผ่านออกมาที่วาล์วรูเข็ม (needle valve) โดยเปิดที่ความดัน แล้วจึงเปิดวาล์วรูเข็มปล่อยให้แก๊สไหลเข้าระบบการปลูกผลึกในเตาแก๊ซอาร์กอนจะไปปะปนกับอากาศภายในควอทซ์และออกมาจากระบบทางปลายควอทซ์ในด้านเดียวกับการไหลแก๊สเข้า แก๊ซจะไหลผ่านวาล์วที่ต่อกับปั๊มโรตารี เพื่อดูเอาแก๊ซที่ปนกับอากาศทิ้งออกไป หลังจากทำการไหลแก๊ซอาร์กอนเข้าไปในระบบการปลูกผลึกเสร็จแล้ว ระบบการปลูกผลึกส่วนใหญ่จะมีแต่บรรยากาศแก๊ซอาร์กอนที่ไหลเข้าไป

2. เริ่มเพิ่มอุณหภูมิเตาที่ระยะทาง 64cm โดยจะวางปลายกรวยแหลมของควอทซ์ไว้ที่ระยะทางนี้เริ่มเพิ่มอุณหภูมิ

จาก 25 - 300 °C แล้วทิ้งไว้ 1 วัน

จาก 300 - 800 °C ในอัตรา 100 °C / ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 1 วัน

จาก 800 - 1000 °C ในอัตรา 50 °C / ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 1 วัน

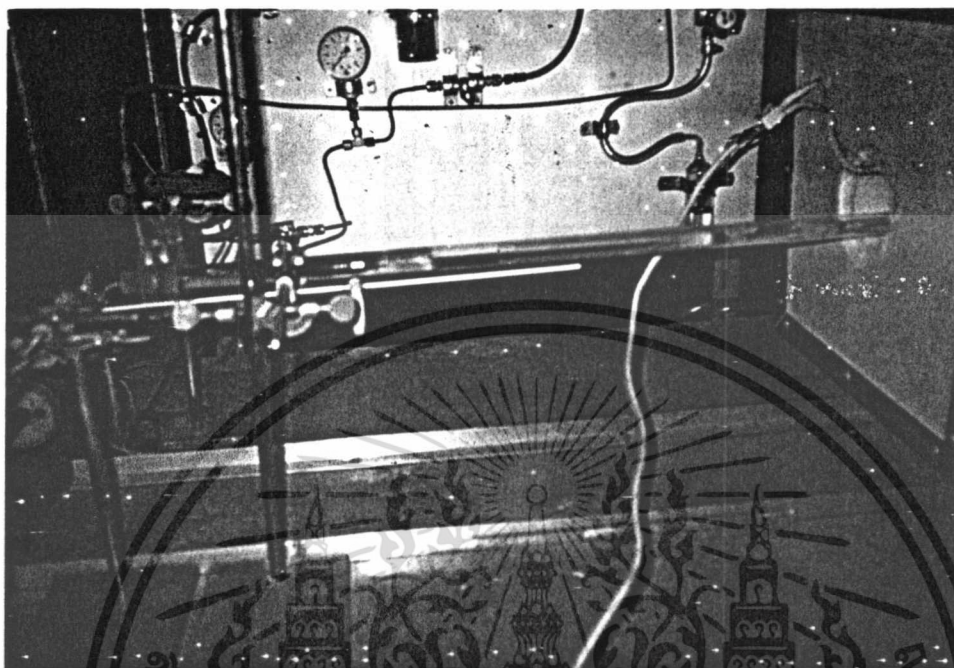
จาก 1000 - 1500 °C ในอัตรา 50 °C / ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ 1 วัน

3. จากนั้นทำการลากเตาด้วยระบบจากเตาที่มีอัตราเร็วเทียบกับระยะทางดังรูปกราฟที่ 5.9

จากกราฟพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการเลื่อนเตาผ่านไปความเร็วเตามีค่ามากขึ้น เนื่องจากว่าเส้นลวดที่ใช้ดึงเตาในช่วงแรกห่อนเมื่อเวลาผ่านไปเส้นลวดถูกดึงให้ตึงขึ้น และลวดที่พันเก็บรอบแกนเพลลาซ้อนกันทำให้รัศมีแกนเพลลาเพิ่มขึ้นระยะเส้นลวดที่ถูกดึงจึงเพิ่มขึ้นตาม

5.4.2.2 ผลของการปลูกผลึก Cds

ตำแหน่งการเกิดผลึก Cds ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13



รูปที่ 5.12 รูปแสดงระบบการปลูกผลึกโดยวิธี PVD



รูปที่ 5.13 แสดงตำแหน่งของการเกิดผลึก

ก. ผลึกที่สมบูรณ์เกิดบริเวณปลายกรวยแหลมซึ่งเป็นนิวเคลียสของการปลูกผลึกได้ ลักษณะรูปกรวย ขนาด 1.5 เซ็นติเมตร

ข. ผลึกมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ เกาะอยู่บริเวณใกล้ปลายกรวยแหลม

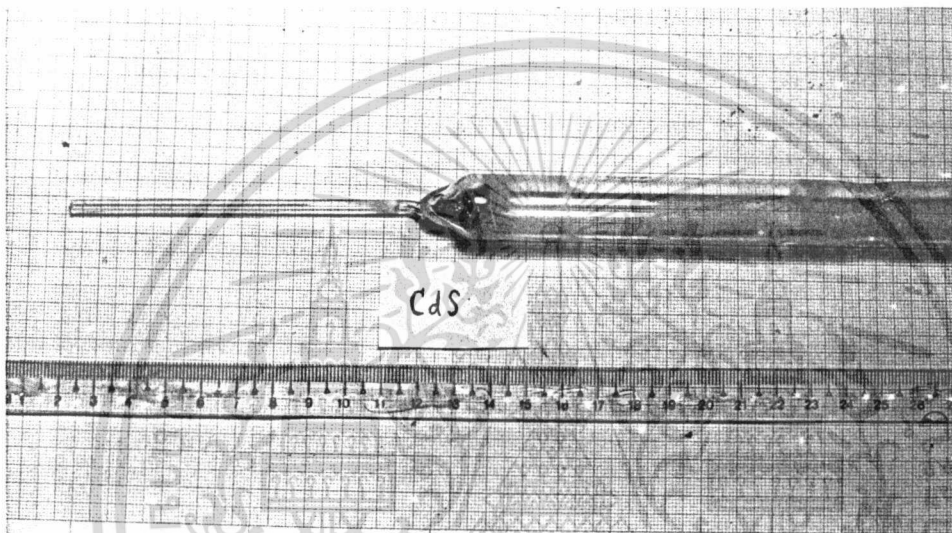
ค. ผลึกที่เกิดจากผงสารประกอบที่เหลือจากการปลูกผลึก

ง. ผลึกที่มีเกรนขนาดเล็กจับรวมตัวกันแน่น

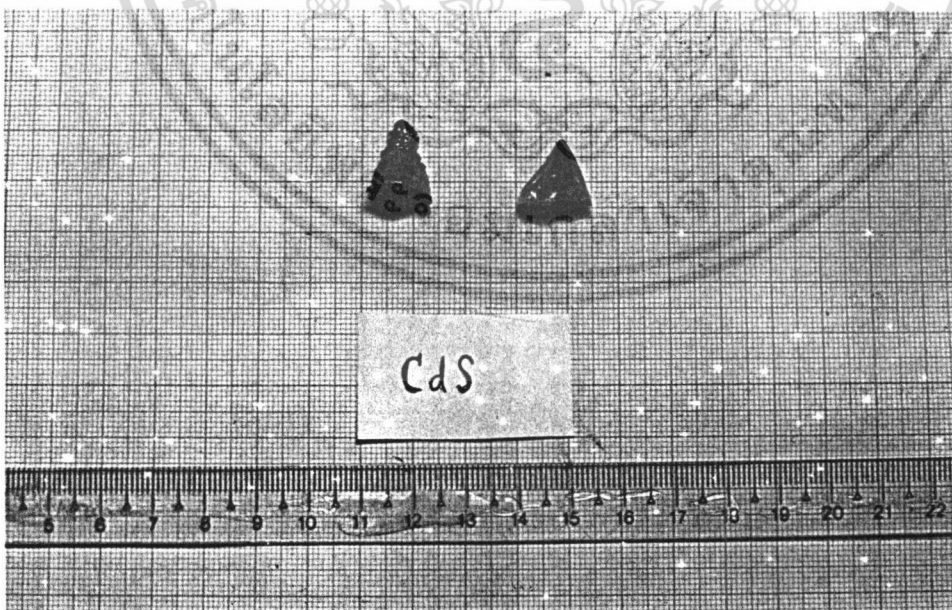
ผลึกที่ได้ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากผลึกที่เกิดบริเวณกรวยปลายแหลมมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับการเกิดผลึกบริเวณอื่น ผลึกที่มีเกรนขนาดเล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากปิดท่อกวอทซ์

ตามการที่ควรจะมีการเกิดผลึกปิดที่บริเวณรอบท่อกวอทซ์ที่ใช้กันสารตั้งต้น CdS แต่ในการดำเนินการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองครั้งนี้กับไม่มีผลึกที่บริเวณนี้ แต่เกิดที่บริเวณปลายท่อควอทซ์บริเวณตรงข้ามกับปลายกรวยแหลมแทน แสดงว่าช่วงบริเวณรอบท่อควอทซ์ที่ใช้กันสารตั้งต้นอุณหภูมิไม่เย็นพอที่จะให้ไอ CdS มาตกผลึกได้จึงไปตกผลึกที่ปลายท่อควอทซ์ซึ่งไกลกว่า และการไหลแก๊อาร์กอน เข้า - ออก ในทางเดียวกัน มีผลทำให้พาไอ CdS มาตกผลึกบริเวณปลายท่อควอทซ์ด้านตรงข้ามปลายกรวยแหลมด้วย



รูปที่ 5.14 (ก)



รูปที่ 5.4 (ข)

รูปที่ 5.14 (ก),(ข) แสดงผลึก CdS ที่ปลูกได้ จากการทดลอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะผิวของผลึก CdS ที่ปลูกได้

- รูปร่างของผลึก CdS เป็นแบบแท่ง สายริบบอน และแบบแผ่น ผลึก CdS บริเวณปลายแหลมมีขนาด 1 เซ็นติเมตร

- ลักษณะผิวมันวาว ผลึกไม่ติดผิวท่อควอทซ์
- ผลึกมีสีเหลืองใสและมีสีน้ำตาลปนเล็กน้อย
- ผลึกแข็ง ไม่เปราะ และแตกหักง่าย
- มีรอยร้าวขนาดเล็ก (micro crack) ในผลึก

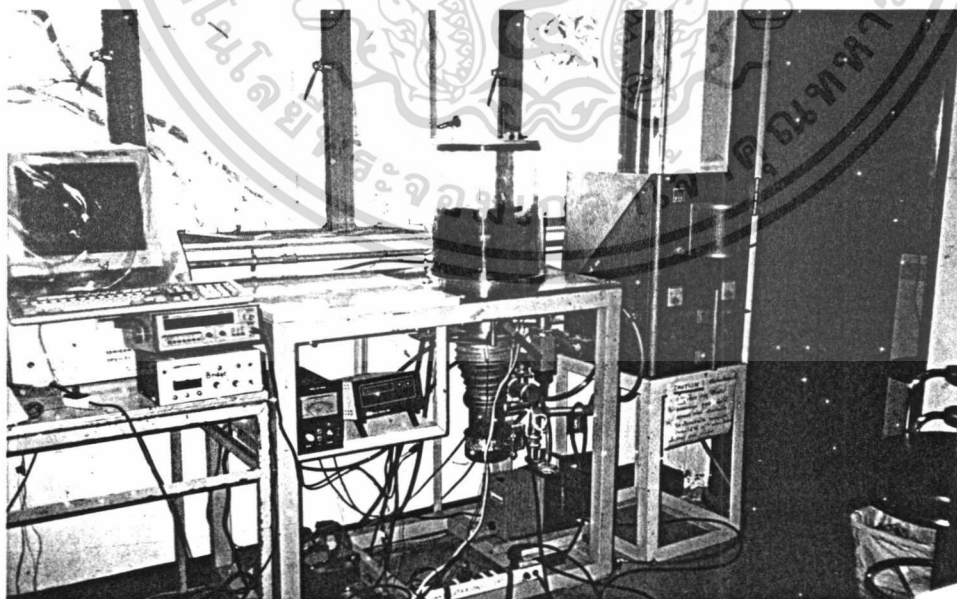
- ผลึกเกิดขึ้นเป็นชั้นซ้อนทับกัน โดยส่วนใหญ่มีทิศทางซ้อนทับอยู่ในทิศทางเดียวกัน แสดงว่าผลึกส่วนใหญ่เกิดจากนิวเคลียสชั้นปลายกรวยแหลมและมีบางส่วนเกิดจากนิวเคลียสที่เป็นสิ่งสกปรกหรือรูเล็ก ๆ ที่ผิวของท่อควอทซ์ (เกิดจากการกัดผิวของกรดที่ใช้ทำความสะอาดท่อควอทซ์)

5.4.3 วิธีเตรียมแผ่นฟิล์มบาง CdS

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ใช้วิธีระเหิดสารที่เป็นผลึกของสารประกอบมีลักษณะเป็นก้อนผลึกขนาดเล็ก ไปเกาะติดบนแผ่นรองรับ (substrate) เป็นกระจกสไลด์ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับสารตั้งต้นให้สารระเหิด เมื่อเสร็จแล้วนำมาทำการแอนนัล

5.4.3.1 ขั้นตอนการระเหยสาร

1 การระเหิดสารประกอบ CdS ให้ไปติดบนแผ่นรองรับ



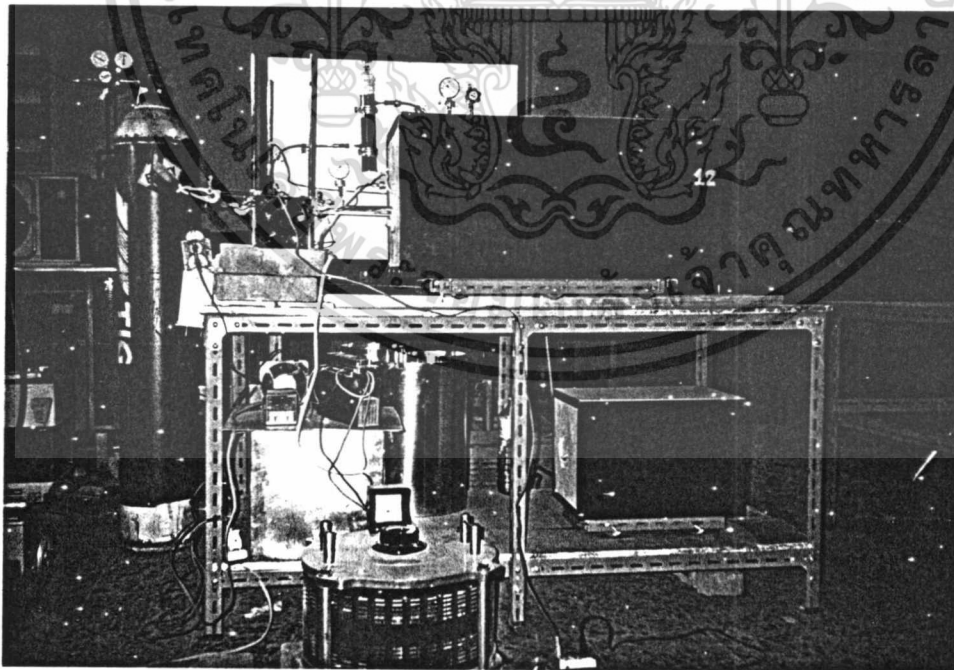
รูปที่ 5.15 แสดงระบบการปลูกฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีไอระเหยแบบ 1 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักศึกษาเห็นาไปเซประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.1 เปิดฝาครอบสุญญากาศออก นำแผ่นรองรับกระจกสไลด์ ขนาด 2.5×1.25 เซนติเมตร² ใส่ในหน้ากากลฟิล์มที่ทำจากแผ่นทองแดงเจาะเป็นช่องขนาดตามต้องการวางไว้ด้านบนดังรูปที่ 5.15
- 1.2 เต็มสารประกอบ CdS ลงในโบท (boat) ทั้งสแตนรูปกรวยให้เต็ม
- 1.3 เปิดโรตารีปั๊มสุญญากาศให้อากาศให้ความดันลดลง $\approx 10^{-2}$ มิลลิบาร์
- 1.4 เปิดคิฟิวซ์ปั๊มจนกระทั่งน้ำมันเดือด (ใช้มือทดสอบแตะแล้วจะรู้สึกร้อน) ทำการไหลของน้ำเย็น (อุณหภูมิ 4°C) สูญญากาศออกจนกระทั่งมีความดัน $\approx 10^{-5}$ มิลลิบาร์
- 1.5 ให้ความร้อนแก่โบทโดยเปิดวารีแอก ให้ความดันจนกระทั่งอุณหภูมิที่โบทประมาณ $1300^{\circ}\text{C} - 1400^{\circ}\text{C}$ (ทราบอุณหภูมิจากการใช้กล้องอินฟาเรดส่องดูที่โบท)
- 1.6 รอนจนกระทั่งสารประกอบ CdS ระเหิดจนหมดลดความดันที่วารีแอกครั้งละ 10 โวลต์ พร้อมกับวัดกระแสและอุณหภูมิของโบท

5.4.3.2 ขั้นตอนการแอนนีสฟิล์มบาง CdS

เนื่องจากฟิล์มบางที่ได้จากวิธีโระเหยจะมีการเรียงตัวของอะตอม หรือโมเลกุลไม่เป็นระเบียบจึงต้องทำการแอนนีสฟิล์มบางเพื่อให้มีการจัดเรียงตัวของอะตอม หรือโมเลกุลเป็นระเบียบขึ้น



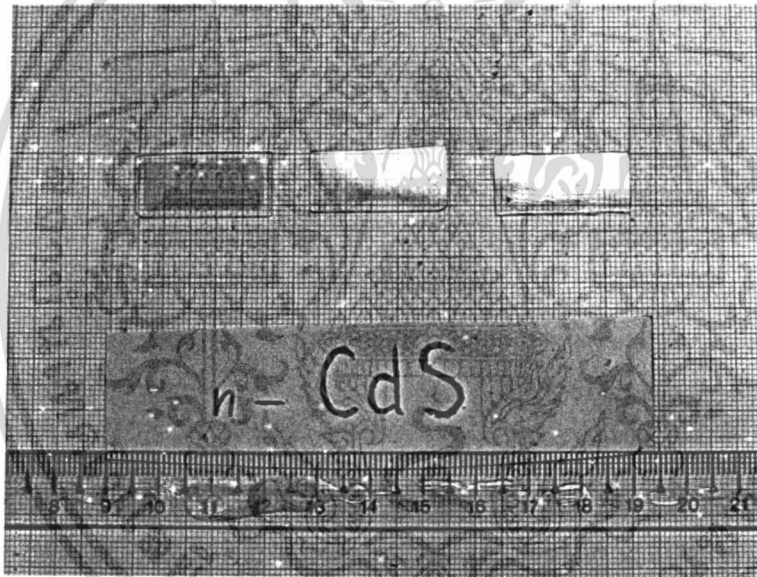
รูป 5.16 แสดงระบบการแอนนีสฟิล์มบาง CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการแอนนีสแผ่นฟิล์มบาง CdS มีดังนี้

1. นำแผ่นฟิล์มบาง CdS มาวางไว้ในท่อควอทซ์ ดังรูปที่ 5.16
2. ทำการสูบอากาศออกจากควอทซ์โดยโรตารีปั๊ม เพื่อไล่อากาศออกจากระบบภายในท่อควอทซ์
3. ทำการไหลแก๊สอาร์กอนผ่านระบบภายในท่อควอทซ์
4. ให้ความร้อนแก่เตาไฟฟ้าโซนเดี่ยวที่อุณหภูมิ 300°C โดยที่แผ่นฟิล์ม CdS อยู่กลางเตาภายในท่อควอทซ์ ปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 นาที เมื่อได้แผ่นฟิล์มที่แอนนีสแล้ว พร้อมทั้งจะนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

5.4.3.3 ผลของฟิล์มบาง CdS ที่ปลูกได้



รูปที่ 5.17 แสดงผลของฟิล์มบาง CdS บางที่ปลูกได้

ฟิล์ม CdS ที่ปลูกได้มีสีเหลืองใสเป็นเงา ถ้ากระจกสไลด์มีรอยขีดข่วนทั้งตามขวางและตามแนวยาวจะมีฟิล์มบาง CdS เกาะติดน้อยกว่ากระจกสไลด์ที่ไม่มีรอยขีดข่วน นำฟิล์มบางที่ได้ไปทำการแอนนีส

5.5 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน

5.5.1 ขั้นตอนการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า ด้วยวิธีขั้วความร้อน

นำผลึกสารตั้งต้น CdS ฟิล์มบาง CdS และผลึก CdS ที่ปลูกได้มาทดสอบหา

ชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อนโดยต้องจงตามรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. นำขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ต่อกับหัวแร้ง และขั้วลบต่อกับแผ่นอลูมิเนียม
2. นำผลึก CdS ที่ต้องการวัดมาวางไว้บนแผ่นอลูมิเนียม
3. นำหัวแร้งวางบนผลึก CdS ที่ต้องการทดสอบ
4. สังเกตเข็มของโวลต์มิเตอร์ถ้าเป็นลบแสดงว่าผลึก CdS เป็นชนิดเอ็น ถ้าเป็นบวกแสดงว่าผลึก CdS เป็นชนิดพี

5.5.2 ผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน

สารตัวอย่าง	ชนิดการนำไฟฟ้า
ผลึกสารตั้งต้น CdS	ชนิดเอ็น
ฟิล์มบาง CdS แผ่นที่ 1	ชนิดเอ็น
ฟิล์มบาง CdS แผ่นที่ 2	ชนิดเอ็น
ผลึก CdS ที่ปลูกได้	ชนิดเอ็น

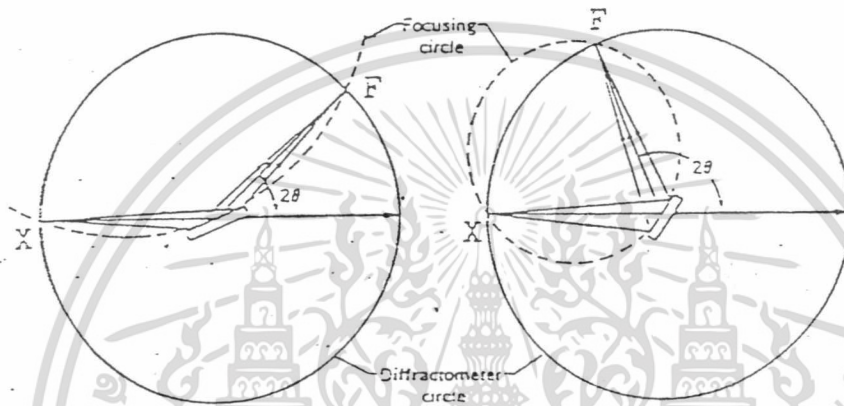
5.6 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก CdS ในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์[5]

จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึก CdS ในเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ จะทำให้ทราบถึงค่าดัชนีมิลเลอร์ ($h k l$) และในงานโครงการนี้ ผลึกที่จะไปทำการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ทำการเตรียมผลึก CdS ดังนี้คือ

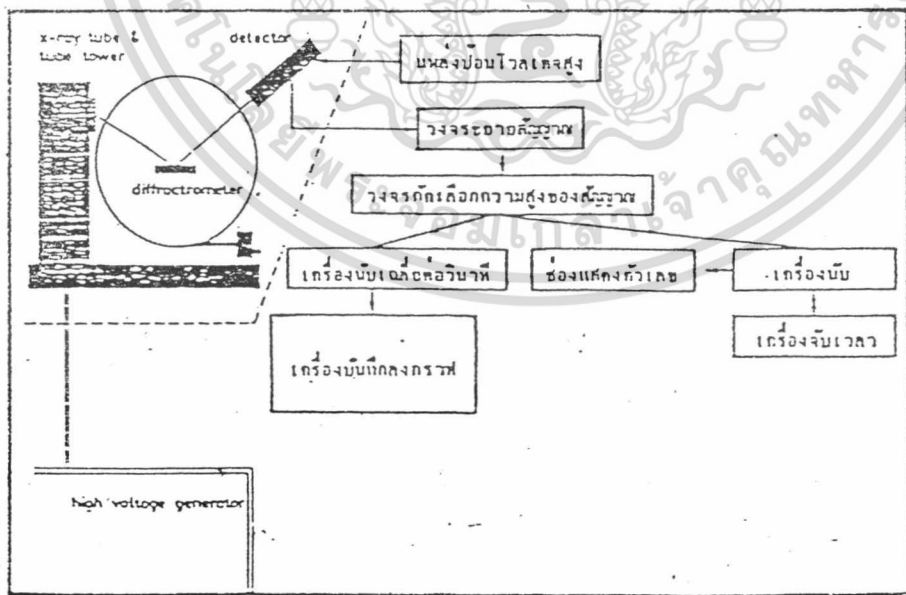
- 1) ผลึกสารตั้งต้น CdS บดเป็นผงแป้ง
- 2) ฟิล์มบาง CdS บนแผ่นรองรับกระจกสไลด์ (substrate) 2 แผ่น
- 3) ผลึก CdS ที่ปลูกได้บดเป็นผงแป้ง

หลักการทํางานคือให้ผลึกสารตัวอย่างวางอยู่กับที่ ที่จุดศูนย์กลางวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer circle) รังสีเอ็กซ์ จากจุดกำเนิด (point source) x มีแนวลู่ออก (diverge) ตกกระทบผลึกสารตัวอย่าง เป็นมุม θ แล้วเลี้ยวเบนในแนวทำมุม 2θ กับแนวรังสีตกกระทบแล้วไปรวมที่จุดโฟกัส (focus) F ดังรูปโดยที่ X และ F อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ทั้งนี้จุดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ผลึกสารตัวอย่างและจุดโฟกัสจะต้องอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโฟกัส (focusing circle) ดังรูปที่ 5.18 ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนออกมาจะตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด (detector) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนโฟตอนของรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณโวลตจ ผ่านวงจรขยายสัญญาณวงจรคัดเลือกความสูงของสัญญาณแล้วเข้าเครื่องนับ (scalar) และเครื่องจับเวลา (timer) แล้วแสดงเป็นตัวเลขให้เห็นดังรูปที่ 5.19 และสัญญาณที่ออกมาจากวงจรคัดเลือกความสูงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสัญญาณจะต้องผ่านเครื่องนับเฉลี่ยต่อวินาที (rate meter) แล้วส่งไปยังเครื่องบันทึก ลงกราฟ (recorder) ในการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ต้องให้ตำแหน่งตัวตรวจวัดจะอยู่ที่จุดโฟกัส และขณะผลึกสารตัวอย่างที่อยู่จุดศูนย์กลางของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์หมุนไปจากเดิมเป็นมุม θ ตัวตรวจวัดต้องหมุนไปเป็นมุม 2θ จากตำแหน่งเดิมรอบวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์



รูปที่ 5.18 แสดงหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์[5]



รูปที่ 5.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6.1 การระบุระนาบของการเลี้ยวเบน

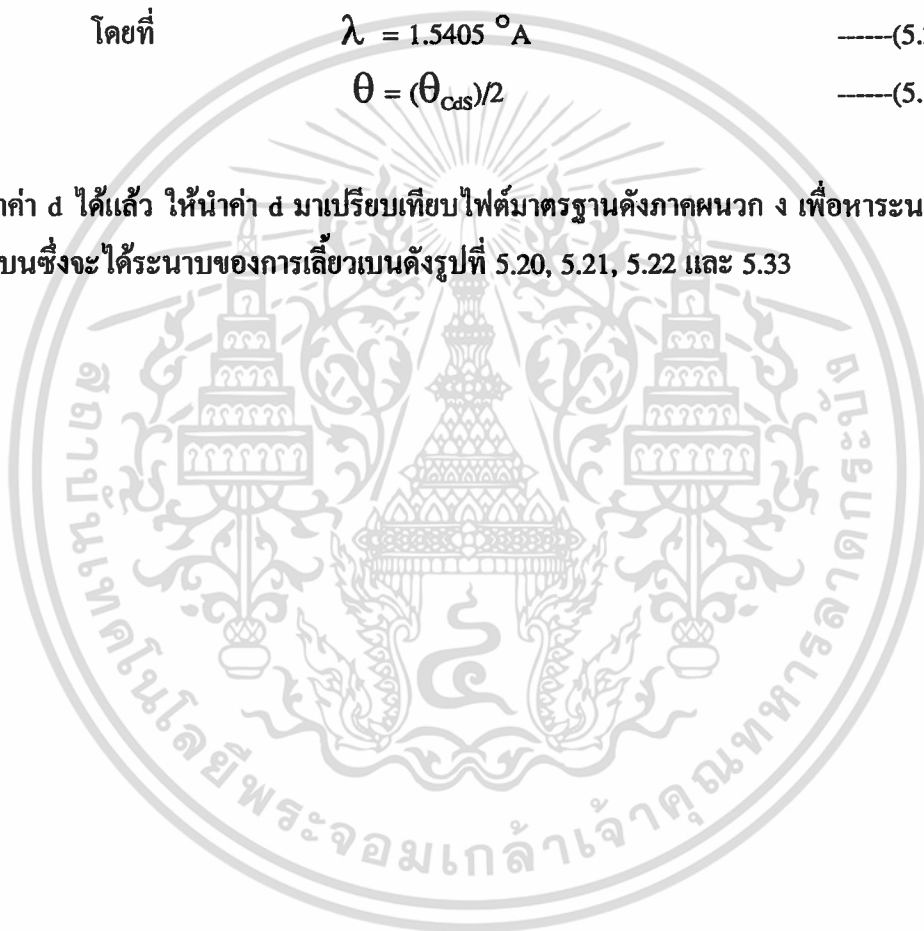
ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก CdS โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ และสมการ (2.12) ที่ใช้สำหรับการหาค่า d ต่อไปนี้
จากสมการ (2.12) การหาค่า d

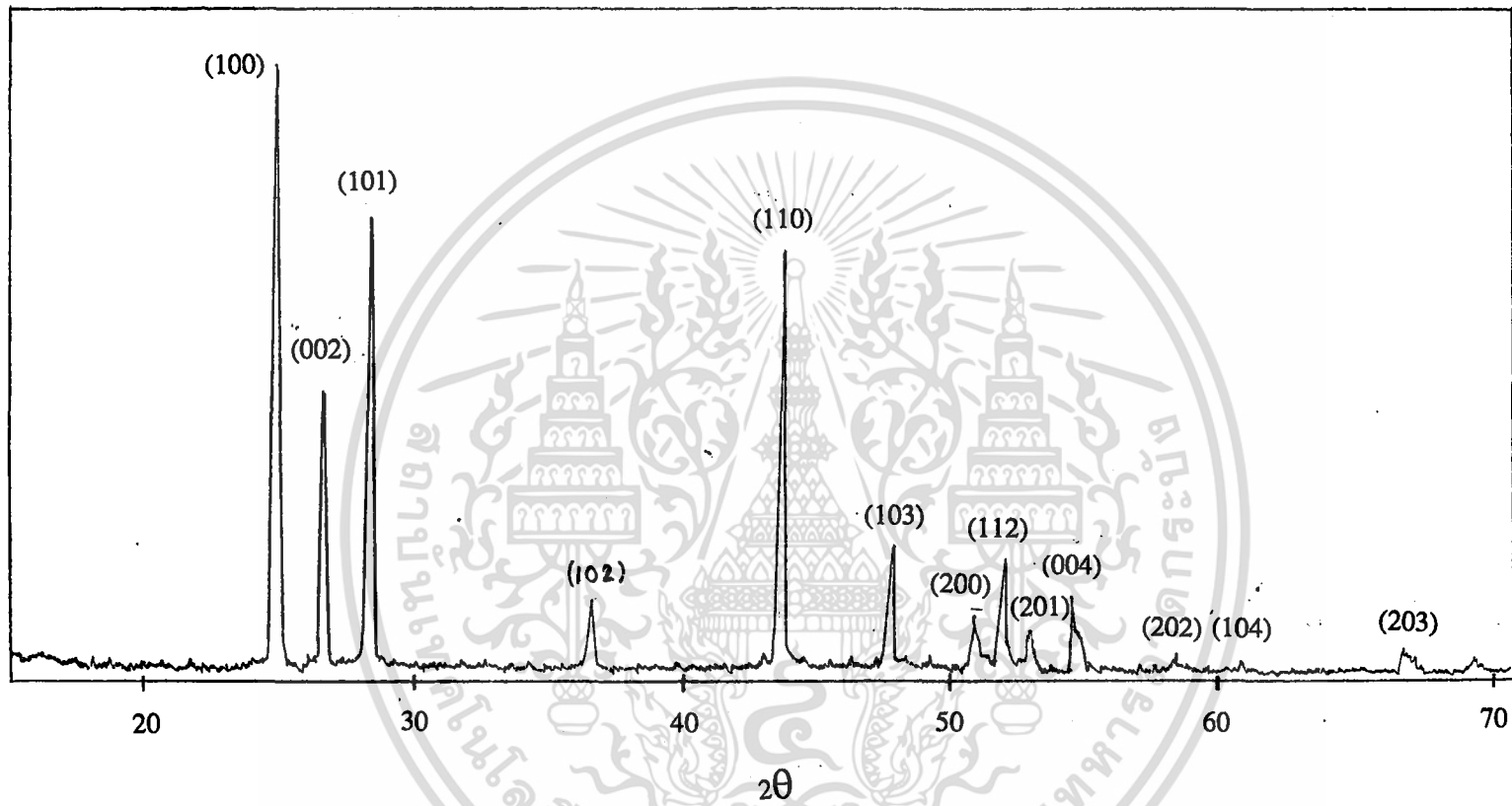
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{----(5.1)}$$

โดยที่ $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ ----(5.2)

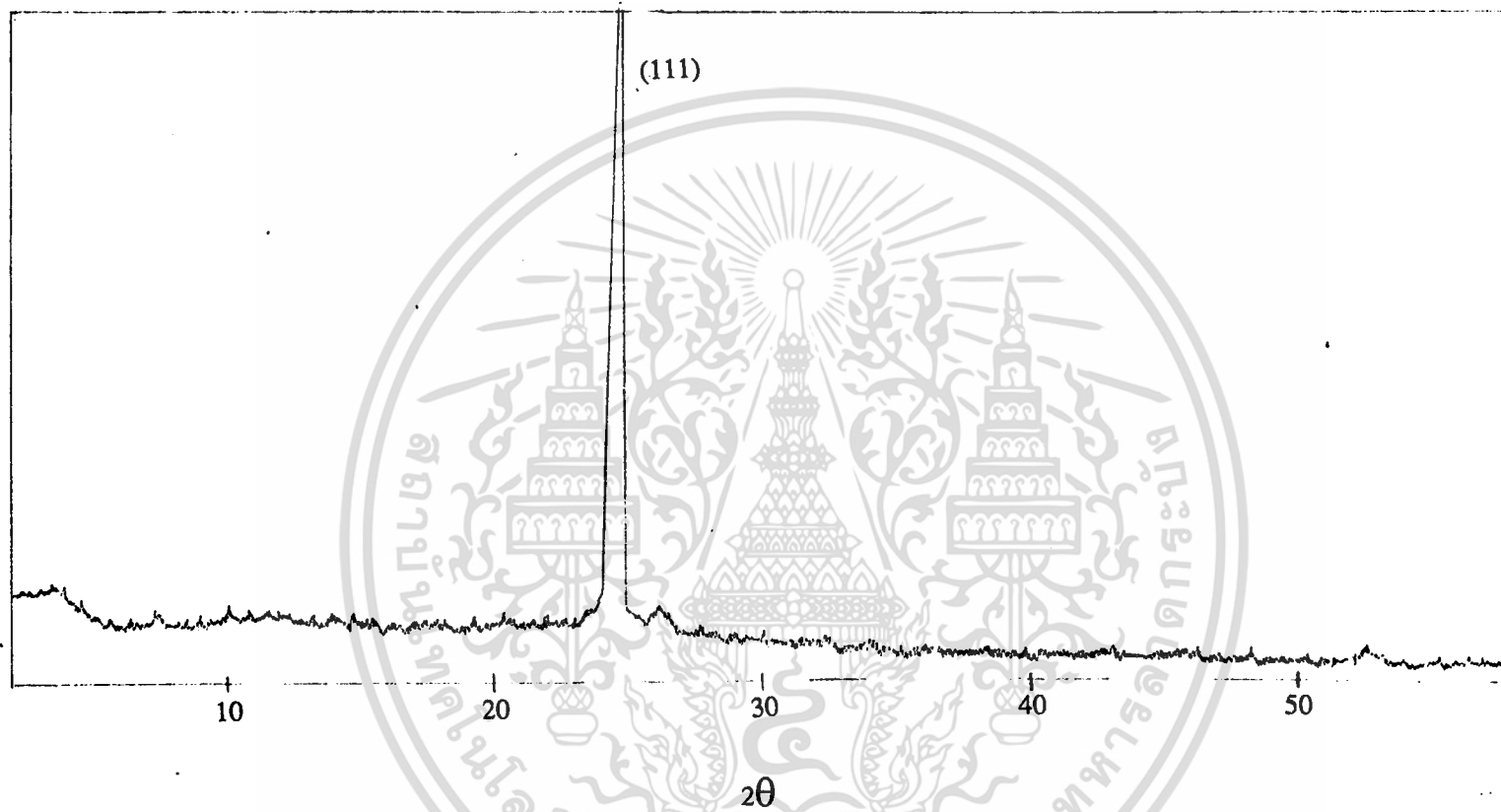
$$\theta = (\theta_{\text{CdS}})/2 \quad \text{----(5.3)}$$

เมื่อคำนวณหาค่า d ได้แล้ว ให้นำค่า d มาเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานดังกล่าวของเฟสเพื่อหาระนาบของการเลี้ยวเบนซึ่งจะได้ระนาบของการเลี้ยวเบนดังรูปที่ 5.20, 5.21, 5.22 และ 5.33

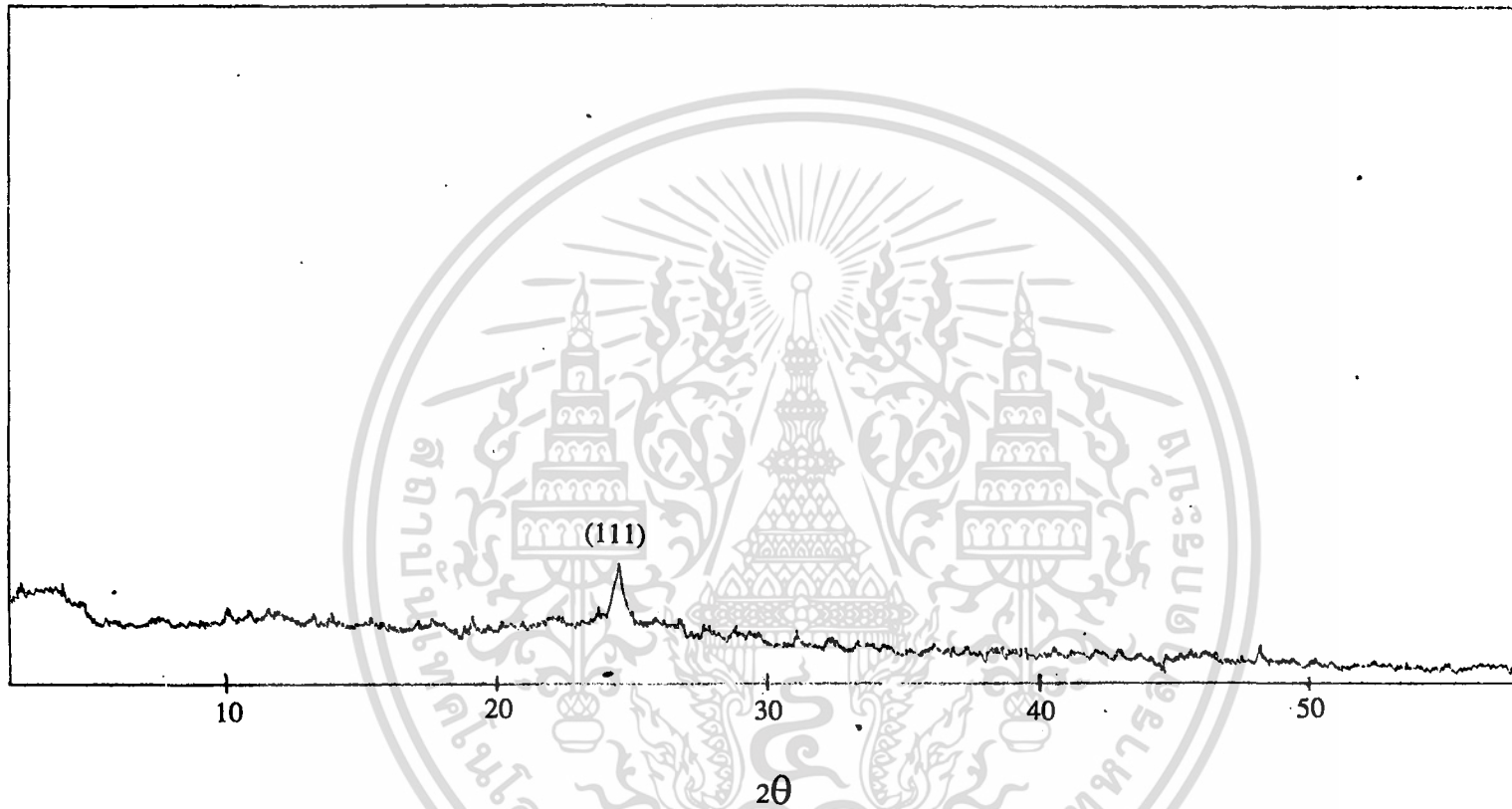




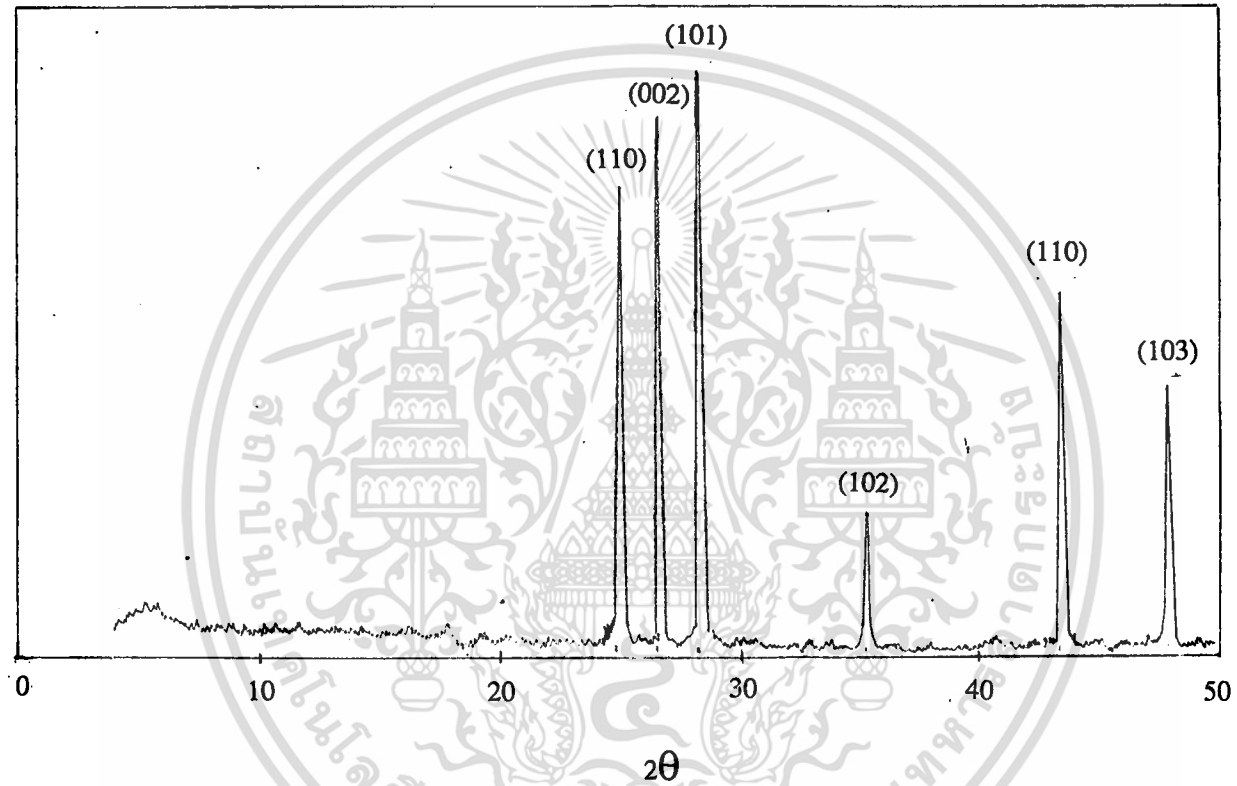
รูปที่ 5.20 แสดงสเปกตรัมระนาบของสารตั้งต้นผลึก CdS ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.



รูปที่ 5.21 แสดงสเปกตรัมระนาบของฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ แผ่นที่ 1 ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.



รูปที่ 5.22 แสดงสเปกตรัมระนาบของฟิล์มบาง CdS บนกระจกสไลด์ แผ่นที่ 2. ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 5.23 แสดงสเปกตรัมระนาบของผลึกCdS ที่ปลูกได้ที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

5.6.2 การหาค่าคงที่ผลึก

เพื่อสามารถหาระนาบของการเลี้ยวเบนแล้วทำให้ทราบว่า ผลึก Cds ในรูปแบบต่าง ๆ มีโครงสร้างต่างกันคือ ผงผลึก Cds และผลึก Cds จะเป็นโครงสร้างเวอร์ทไฮท์ ส่วนฟิล์มบาง Cds จะเป็นโครงสร้างซิงค์เบลนด์ ทำให้ใช้สมการหาค่าคงที่ผลึกต่างกัน จากสมการ (2.5) และ (2.6) จะได้ค่าคงที่ผลึกดังต่อไปนี้

(ก) สารตั้งต้นผลึก Cds มีโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ มีค่าคงที่ผลึก 2 ค่าคือ $a = 4.150(6) \text{ \AA}$ และ $c = 6.368(3) \text{ \AA}$

(ข),(ค) ฟิล์มบาง Cds มีโครงสร้างผลึกซิงค์เบลนด์มีค่าคงที่ผลึกคือ $a = 5.820(7) \text{ \AA}$

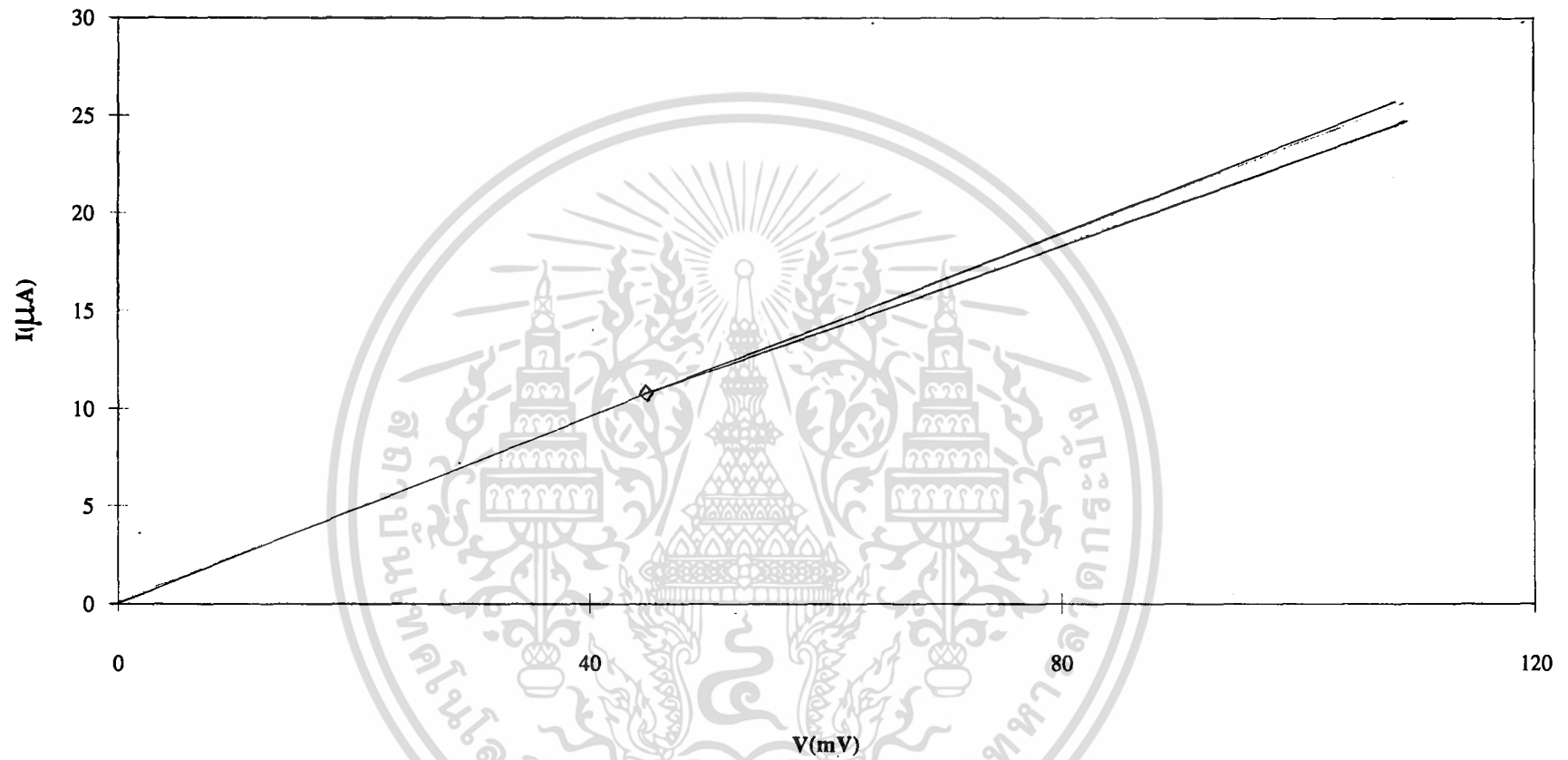
(ง) ผลึก Cds ที่ปลูกได้มีโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์มี มีค่าคงที่ของผลึก 2 ค่าคือ $a = 4.163(4) \text{ \AA}$ และ $c = 5.820(7) \text{ \AA}$

5.7 การศึกษารอยสัมผัสโอห์มมิก

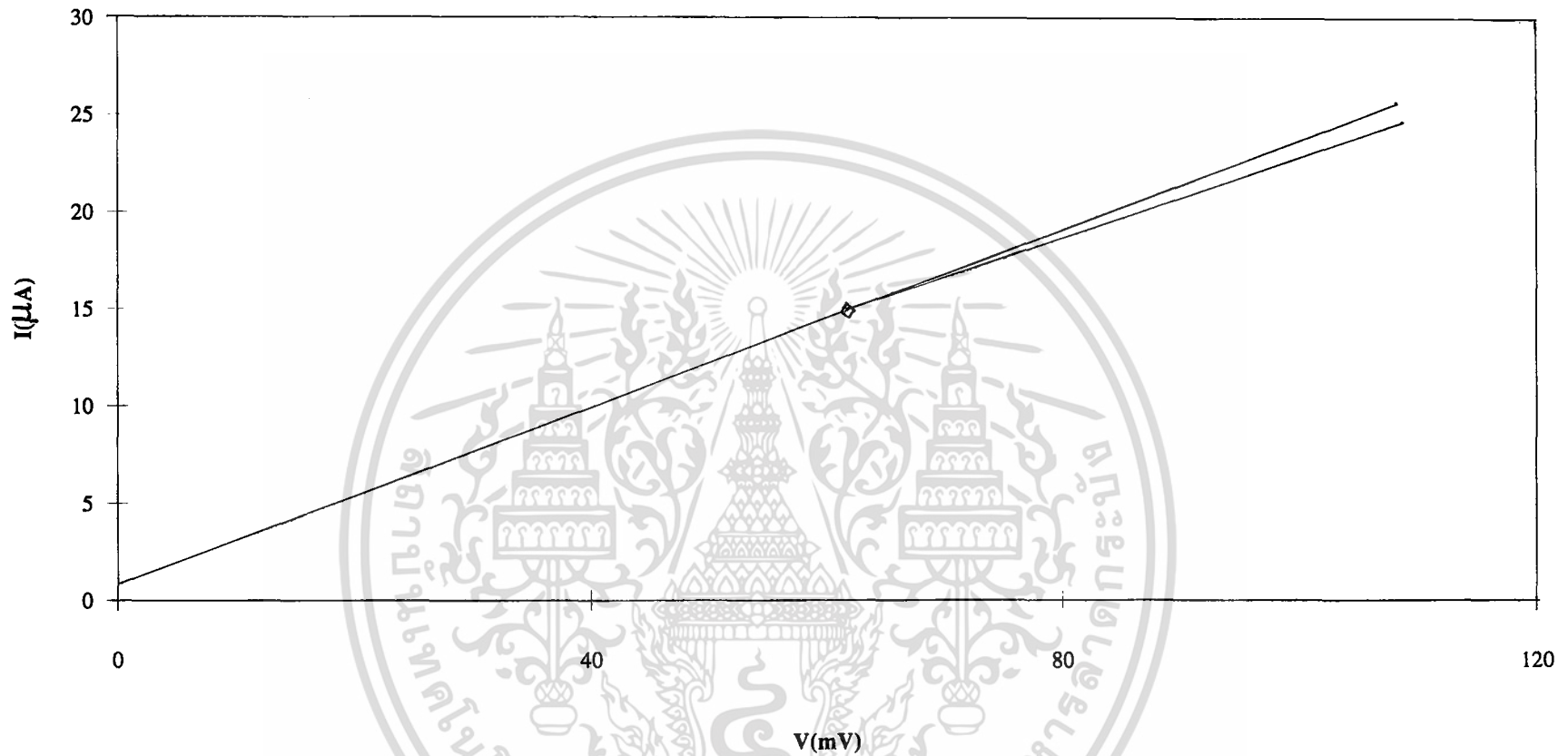
ในการทำจุดสัมผัสโอห์มมิกกับผลึก Cds ที่ปลูกได้ชนิดอื่น ด้วย In โดยมีกาเวเงินเป็นขั้วไฟฟ้า และทำการแอนนัลภายใต้บรรยากาศแก๊ซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในการทำความเข้าใจผลึก Cds มีดังนี้

1. ใช้กระดาษทรายขัดผิวหน้าผลึกให้เรียบมีความหนาสม่ำเสมอตลอดทั้งผลึก
2. แช่ในสารละลาย HCl:HNO₃:DI (DI water) ในอัตราส่วน (7.5:12.5:10) เป็นเวลา 5 วินาที
3. แช่ในเมทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5-10 วินาที
4. แช่ในน้ำ DI หลายๆ ครั้ง
5. ปฏิบัติซ้ำใน (2-4) อีกครั้งหนึ่ง

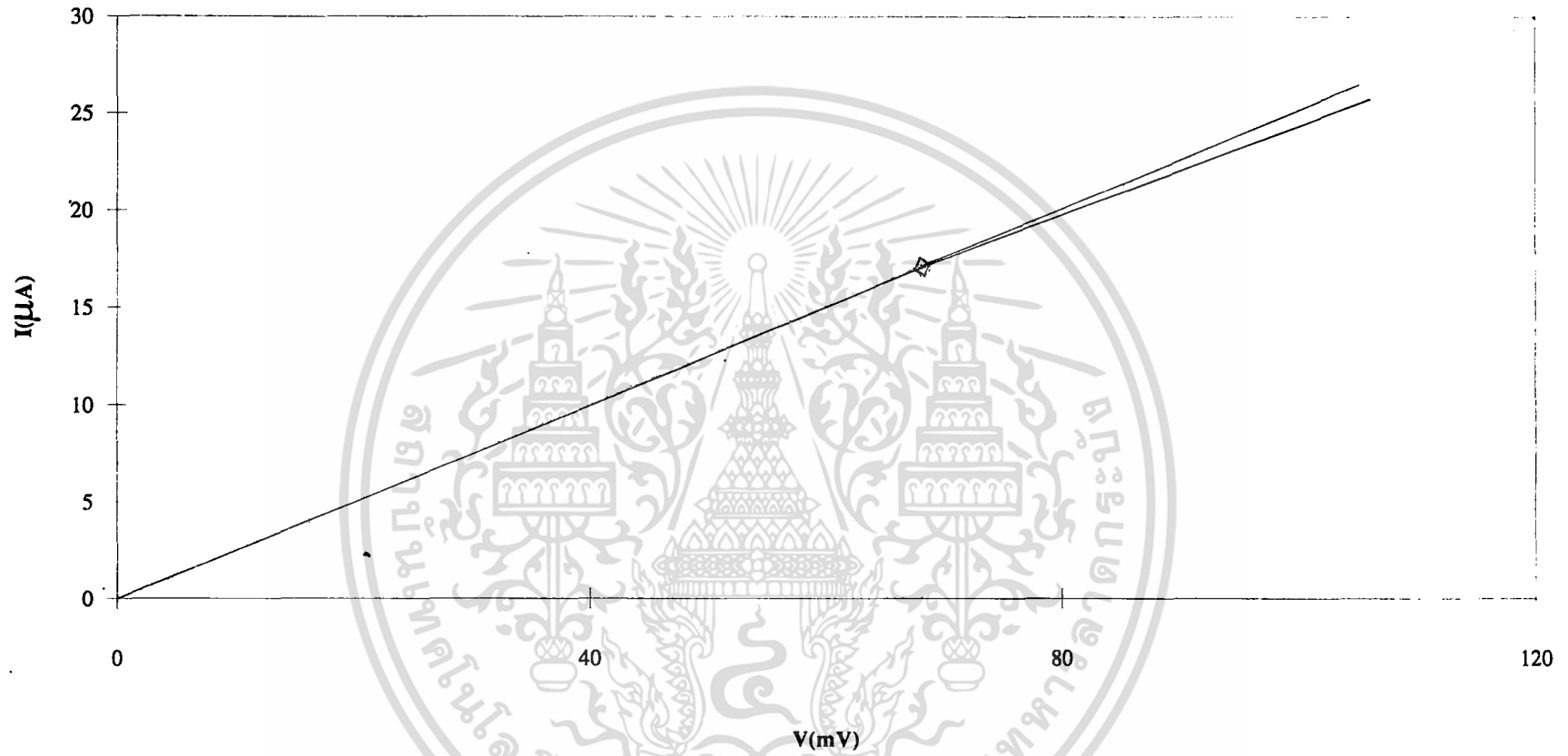
ในผลึก Cds ที่สภาพความต้านทานไฟฟ้าต่างกันจะให้ค่ากระแสสูงสุด I_0 (กระแสรีชาร์ดสัน) ที่ยังคงเป็นโอห์มมิก (I-V กลับขั้วยังคงเป็นเส้นตรง) ต่างกัน I_0 ของผลึก Cds มีสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) สูงจะมีค่าน้อยกว่าผลึกที่มี ρ ต่ำ I-V ของผลึกที่วัดได้ที่อุณหภูมิต่างๆสามารถนำไปหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานของสิ่งเจือปนของ Cds มีดังนี้



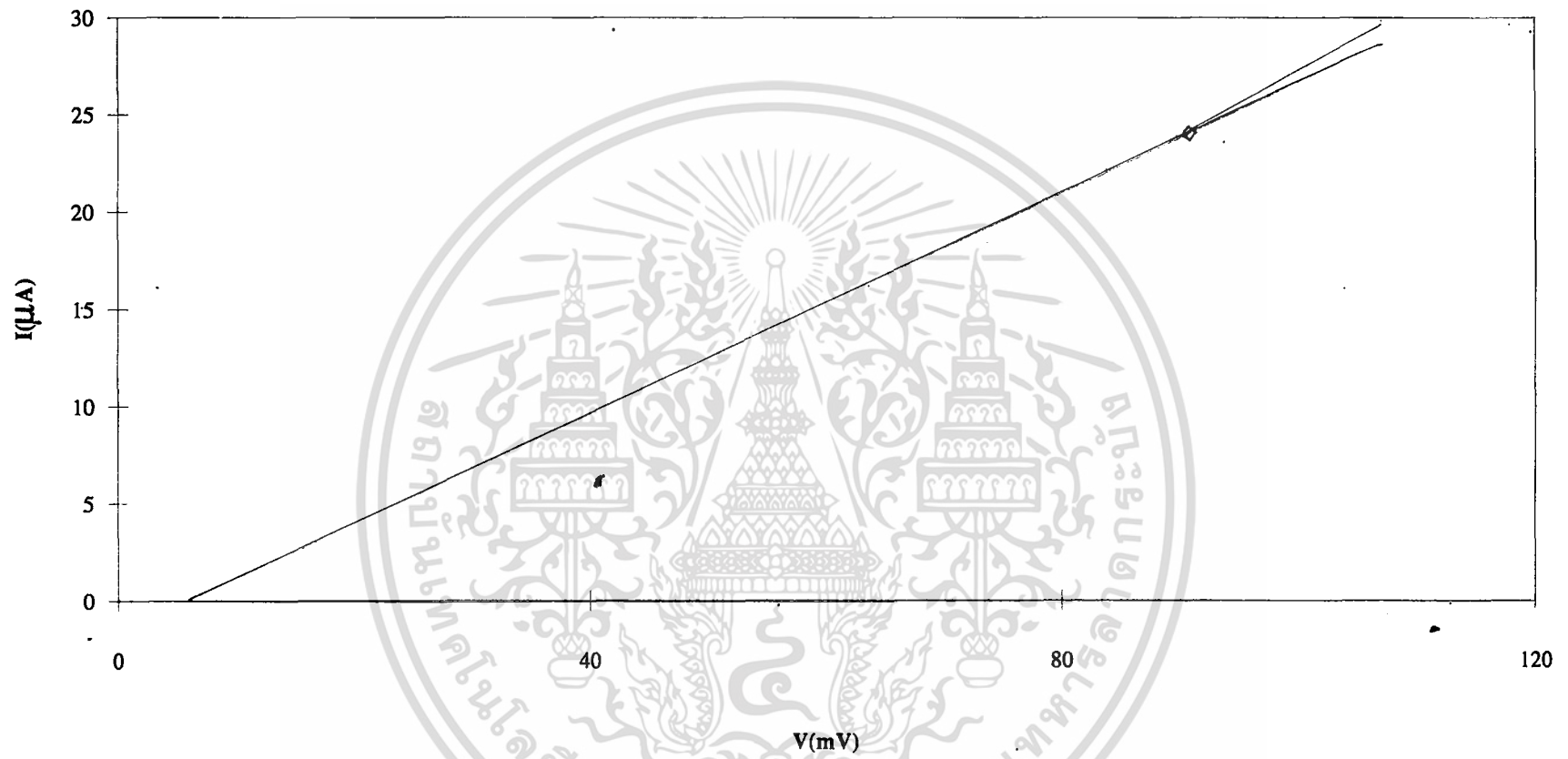
รูปที่ 5.24 แสดงค่ากระแสชาร์ดิสัน (I_s) ที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS



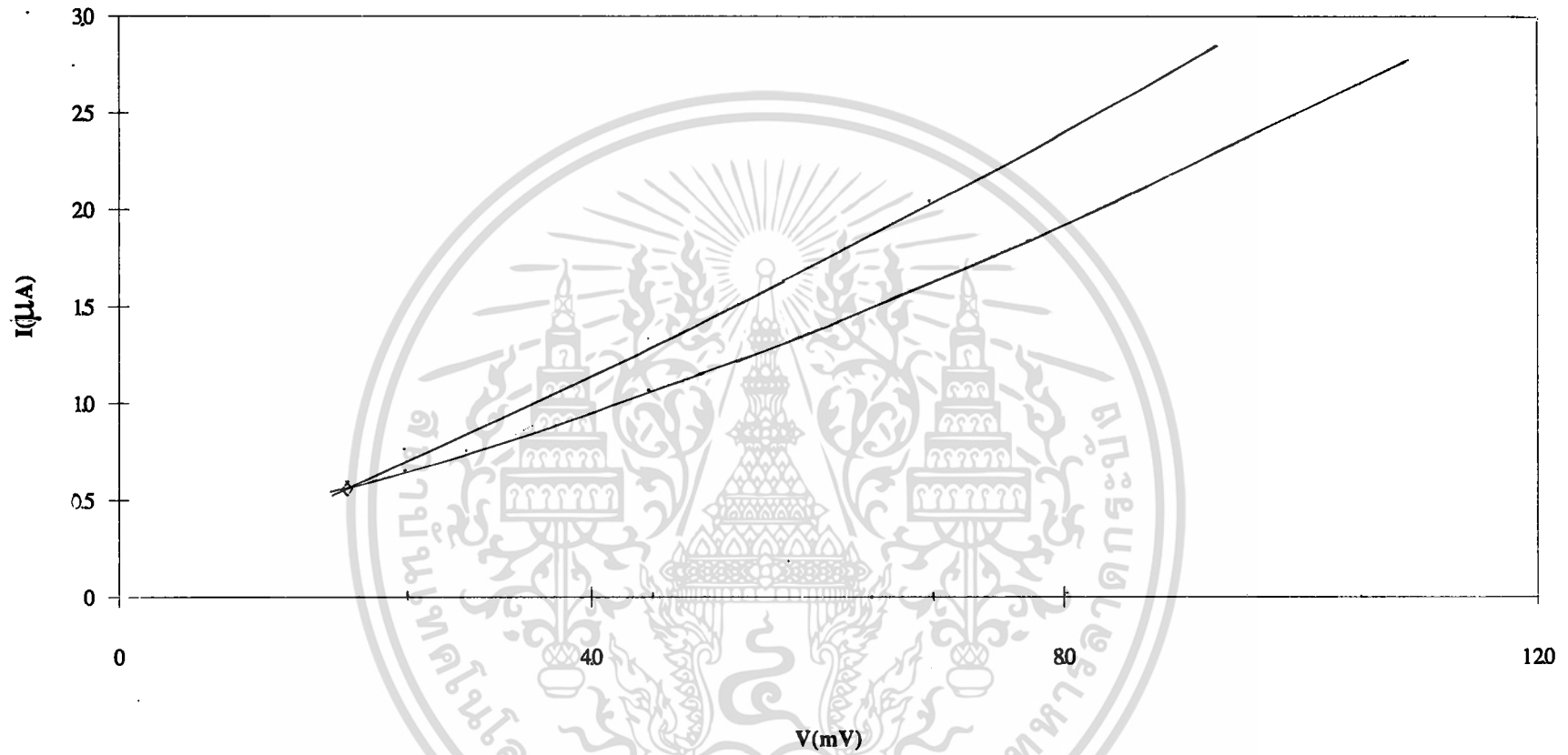
รูปที่ 5.25 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน (I_0) ที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และฟอสฟอรัส CdS.



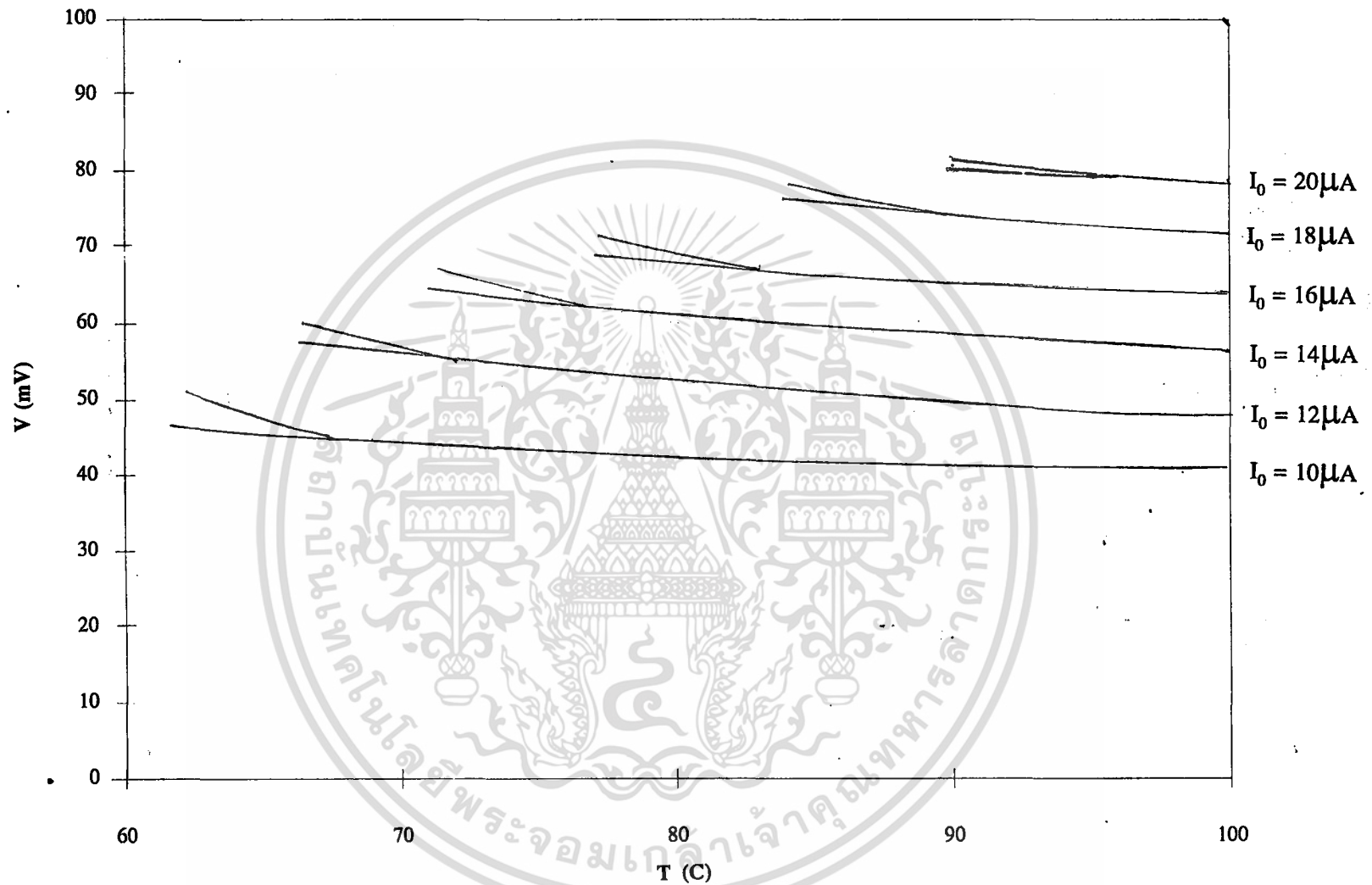
รูปที่ 5.26 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และฟลัก CdS



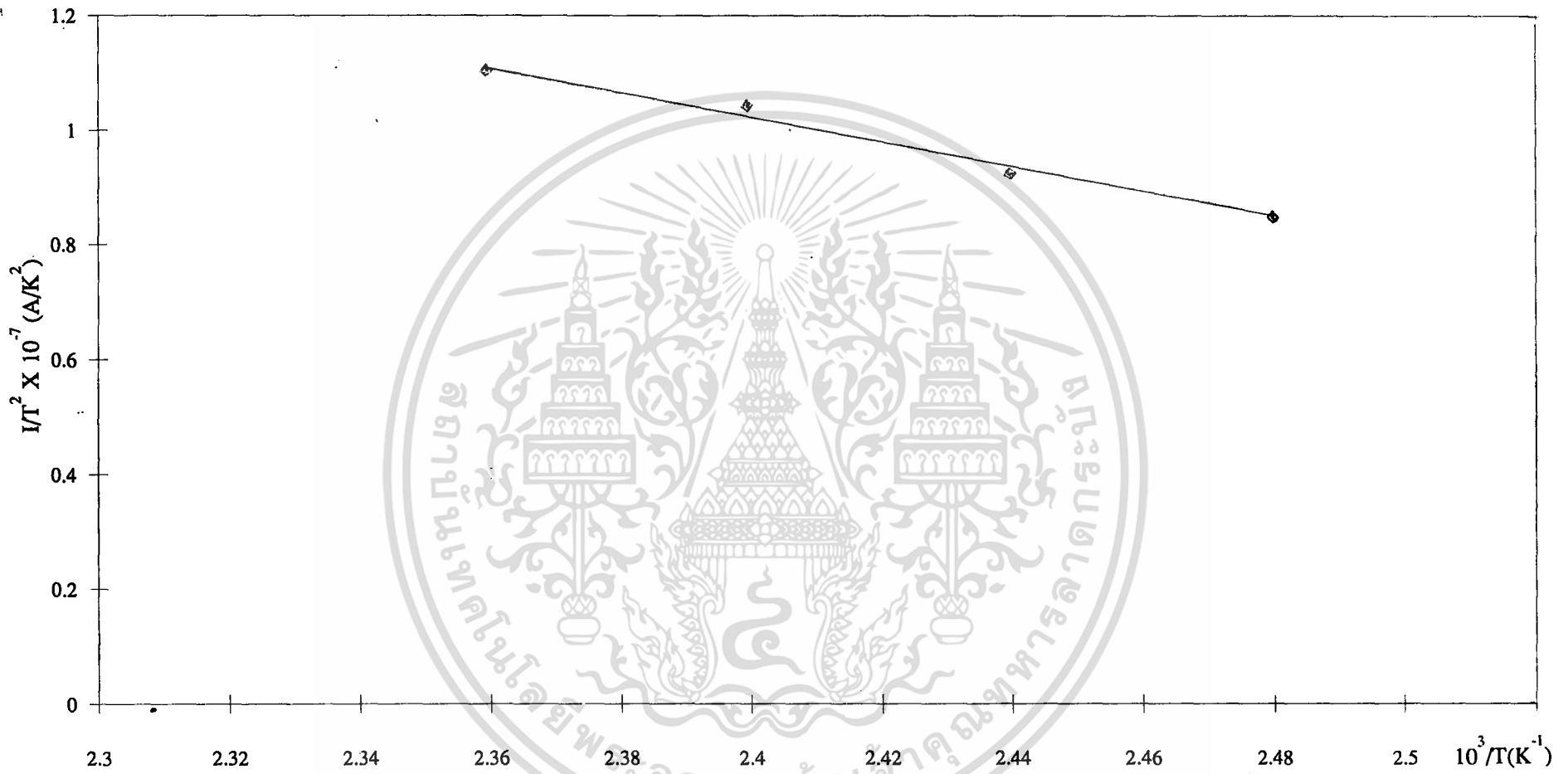
รูปที่ 5.27 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน (I_r) ที่อุณหภูมิ 100 C° จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.



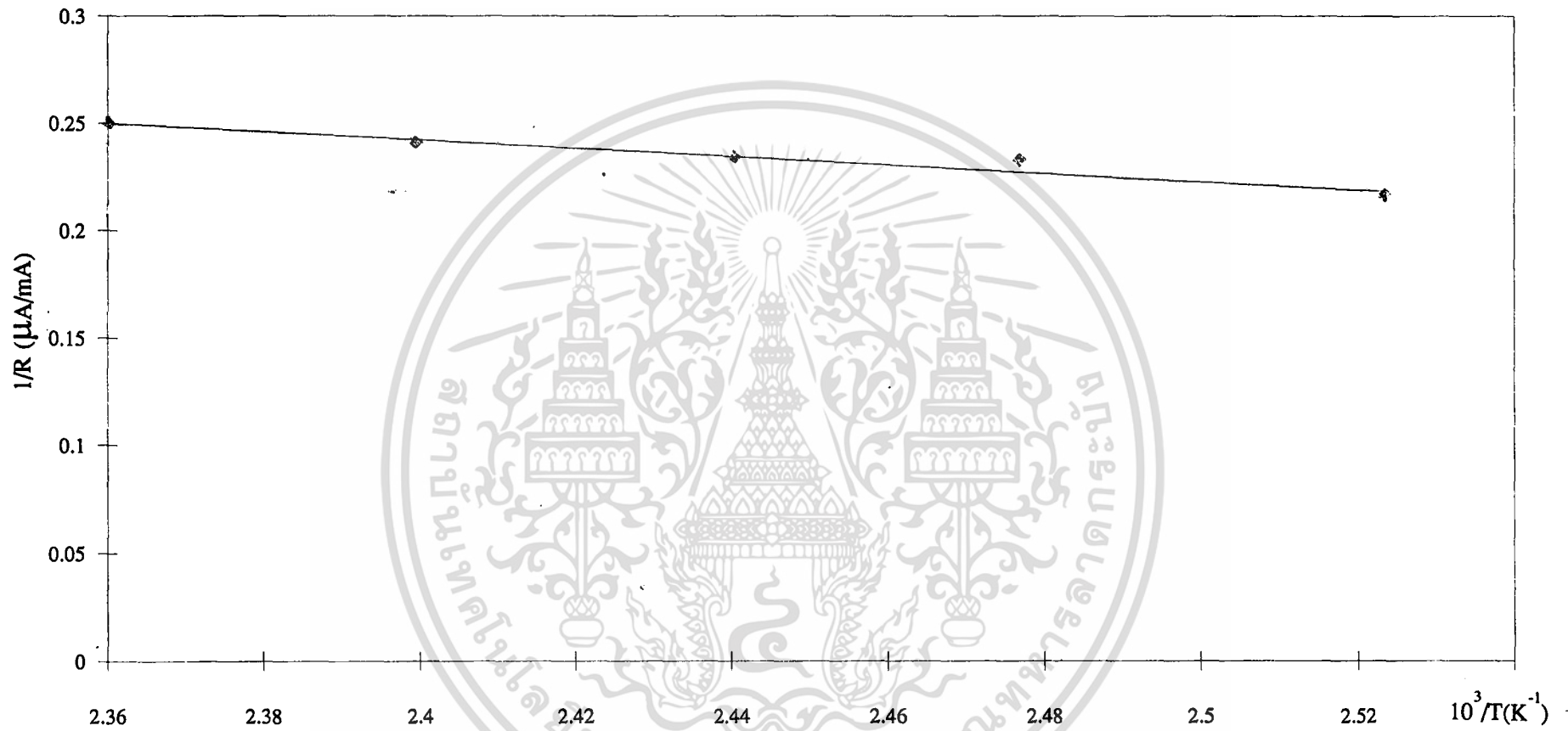
รูปที่ 5.28 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน (I_0) ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากกราฟระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และฟิล์มบาง CdS



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงค่าระหว่างความต่างศักย์ และอุณหภูมิที่กระแสที่ค่าต่างๆ ของรอยต่อระหว่าง In และพลีค CdS



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง In และผลึก CdS.



รูปที่ 5.31 แสดงค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของผลึก CdS จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารและอุณหภูมิ

5.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์[5]

หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติทางผลึกวิทยาแล้ว ทำให้ทราบว่าสารที่เตรียมไว้บริสุทธิ์หรือไม่ แต่ยังไม่ทราบถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างแต่ละตัว ดังนั้นวิธีพื้นฐานแรกที่จะตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าคือ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่หลายวิธีแต่ในโครงการครั้งนี้ได้เลือกใช้ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับโครงการนี้ เนื่องจากสารตัวอย่างมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ในการทดลองจะมีรายละเอียดดังนี้

5.8.1 ขั้นตอนในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า

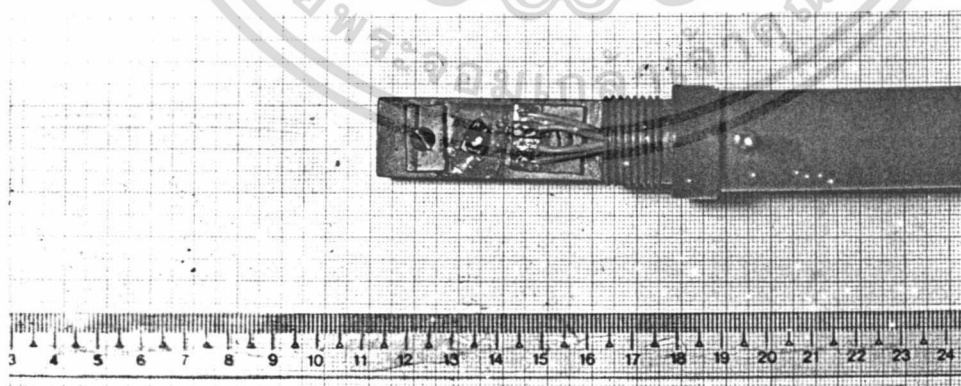
1. นำก้อนผลึก CdS ที่ปลูกได้โดยผ่านการขัดผิวหน้าผลึกแล้ว หรือฟิล์มบาง CdS ใส่ในอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าสภาพความต้านไฟฟ้าดังรูปที่ 5.32

2. นำเทปกาวสองหน้ามาติดระหว่างผลึก CdS และอุปกรณ์เพื่อให้สารที่จะใช้ทดสอบยึดติดอยู่กับอุปกรณ์

3. นำลวดทองแดงมาตัดให้เหมาะสมเพื่อใช้ทำเป็นขั้วที่โงงออกมาจากสาร

4. นำปลายข้างหนึ่งของลวดทองแดงจิ้มกาวเงินมาแต่ละลงบนขอบของผลึก CdS ซึ่งเป็นจุดสัมผัส In ส่วนอีกข้างทำการบัดกรีแล้วทำเช่นนี้ให้ครบทั้ง 4 มุม โดยต้องแน่ใจว่าแต่ละจุดสมมาตรกันมากที่สุด

5. นำเอทิลอะซิเตทมาหยดลงบนกาวเงินเพื่อช่วยในการทำให้กาวเงินติดลงบนสารมากขึ้น ขยับแต่ละขั้วอย่างเบามือเพื่อให้แน่ใจว่ารอยต่อติดแน่นดีแล้ว ถ้าไม่ติดให้ทำตามขั้นที่ 4 และ 5 อีกครั้ง ซึ่งมีเม็ดสารที่พร้อมจะทำการทดลองดังรูปที่ 5.32

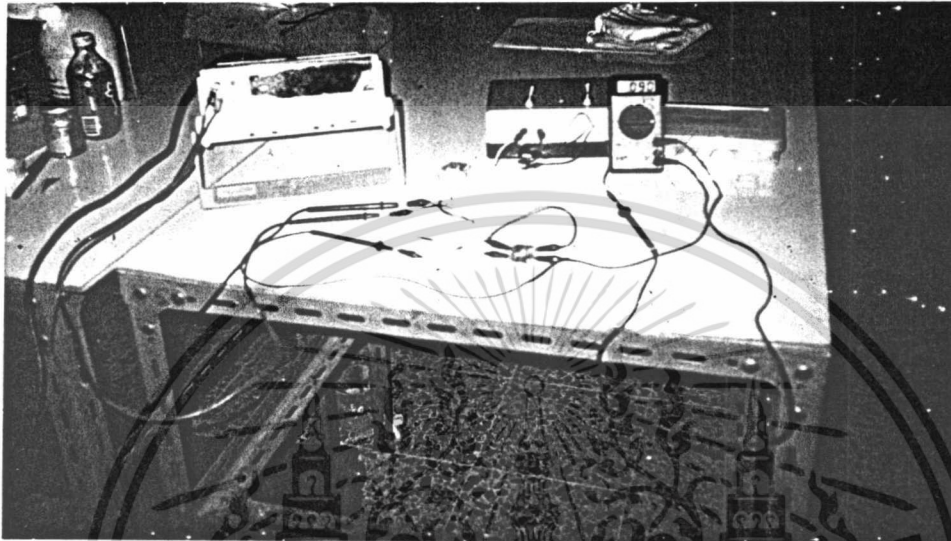


รูปที่ 5.32 แสดงผลึก CdS ที่พร้อมจะทำการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า
ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบสาร

1. นำอุปกรณ์ที่เตรียมไว้มาต่อวงจรดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า[๕]

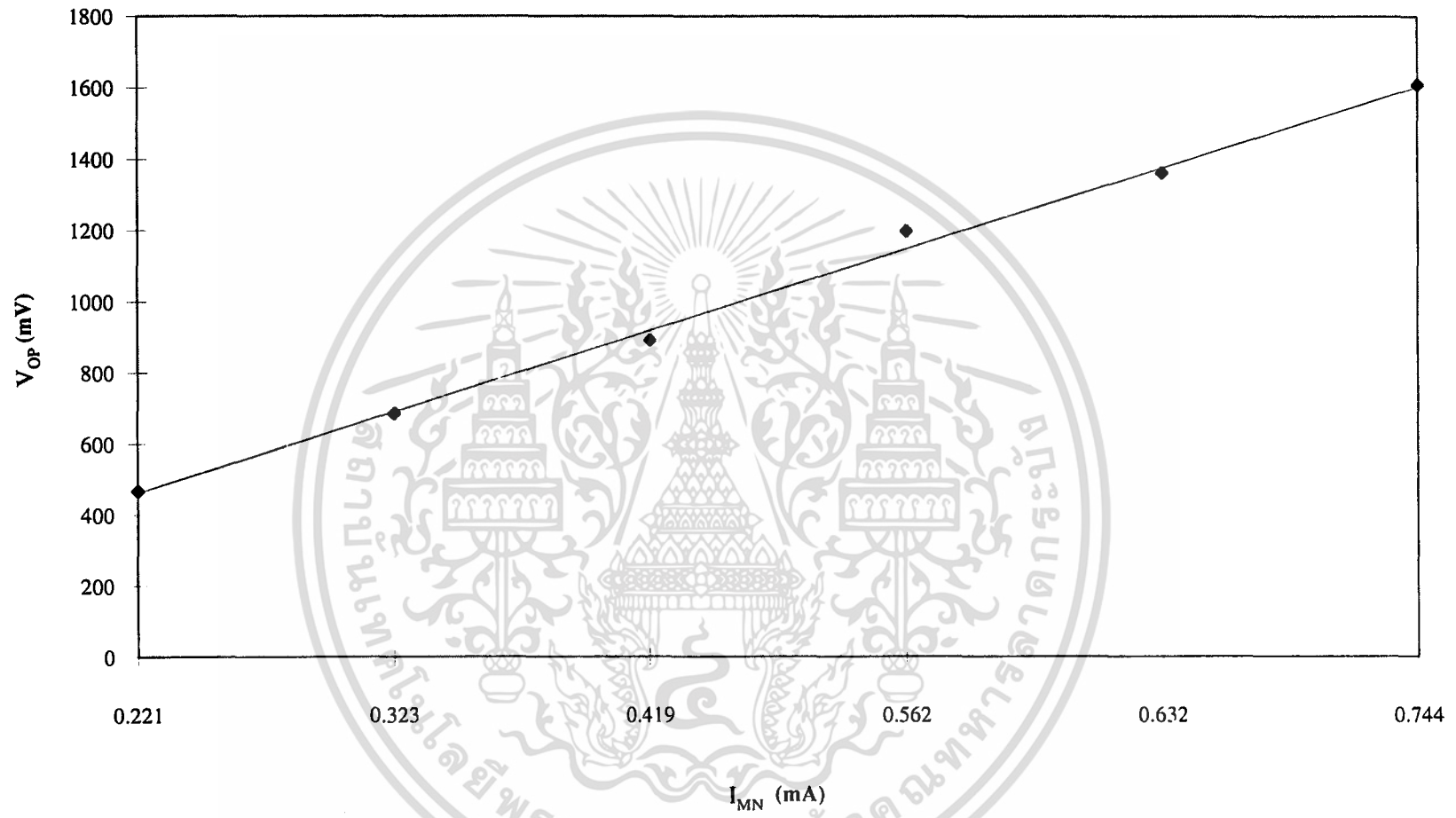
2. ป้อนกระแสให้แก่สารตัวอย่าง ผลึก CdS บริสุทธิ์หลาย ๆ ค่าที่จุด MN แล้วอ่านค่าความต่างศักย์ที่จุด OP ที่ค่ากระแสนั้น ๆ บันทึกค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้

3. เปลี่ยนจุดป้อนกระแสเป็นจุด NO โดยป้อนกระแสหลาย ๆ ค่า อ่านค่าความต่างศักย์ที่จุด PM ที่ค่ากระแสนั้น ๆ บันทึกค่ากระแสและแรงดันที่วัดได้

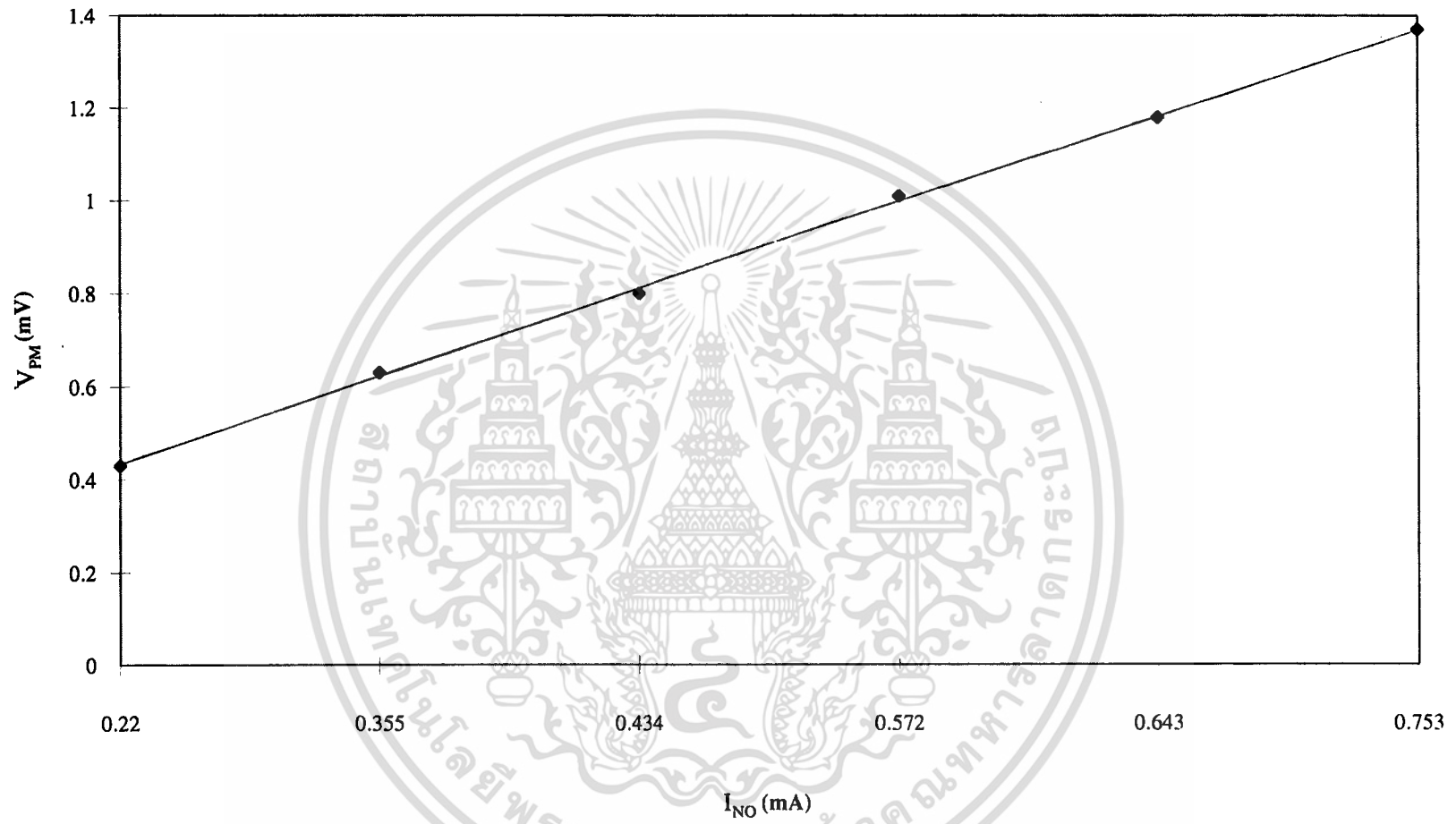
5.7.2 การคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.7.2 และสมการที่ 4.5 สามารถนำไปสู่การหาค่าสภาพความต้านทานได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ดังรูปกราฟที่ 5.34

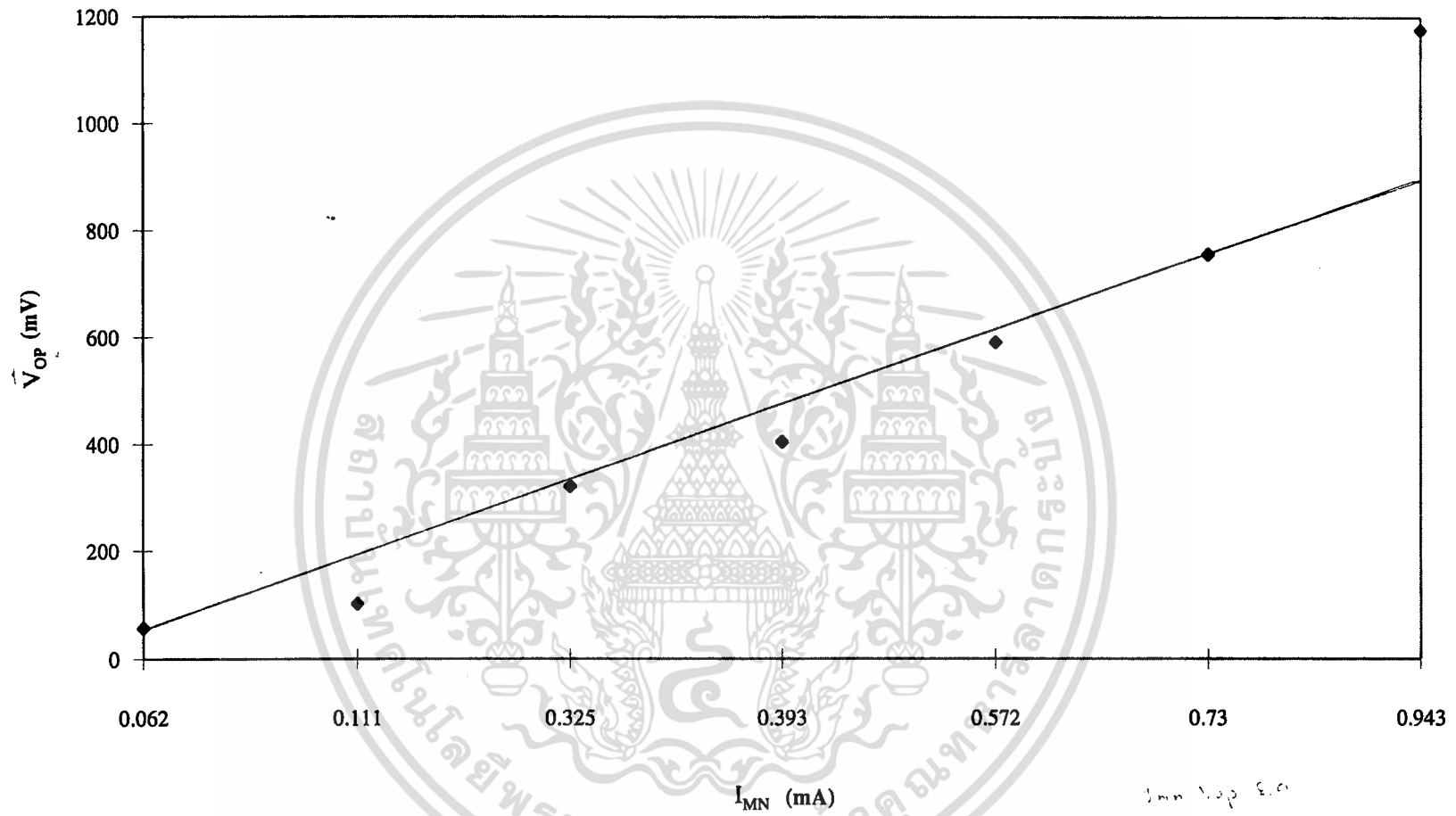
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



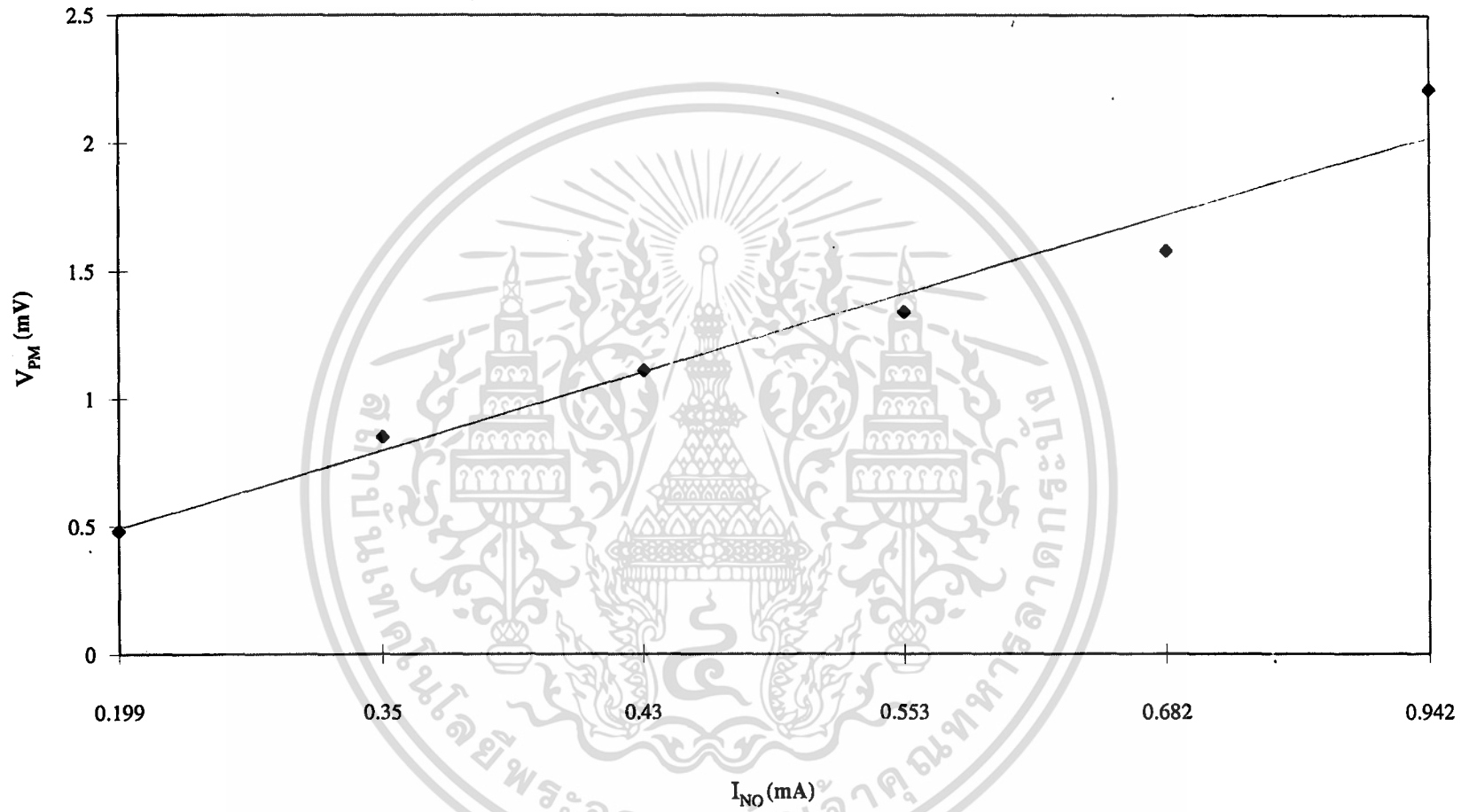
รูปที่ 5.34 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP} เมื่อวัดในที่มีด



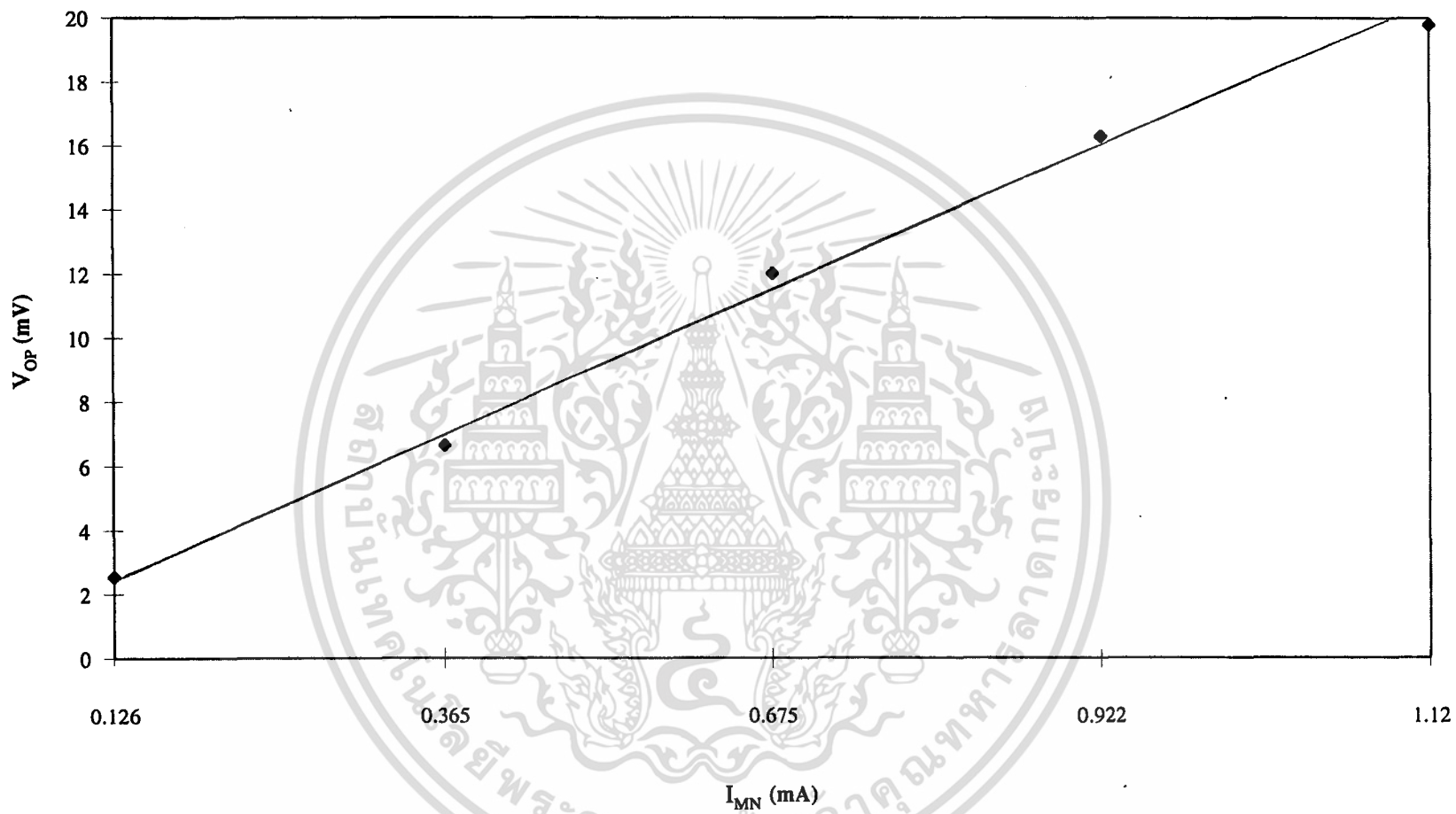
(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM} เมื่อวัดโนที่มีด



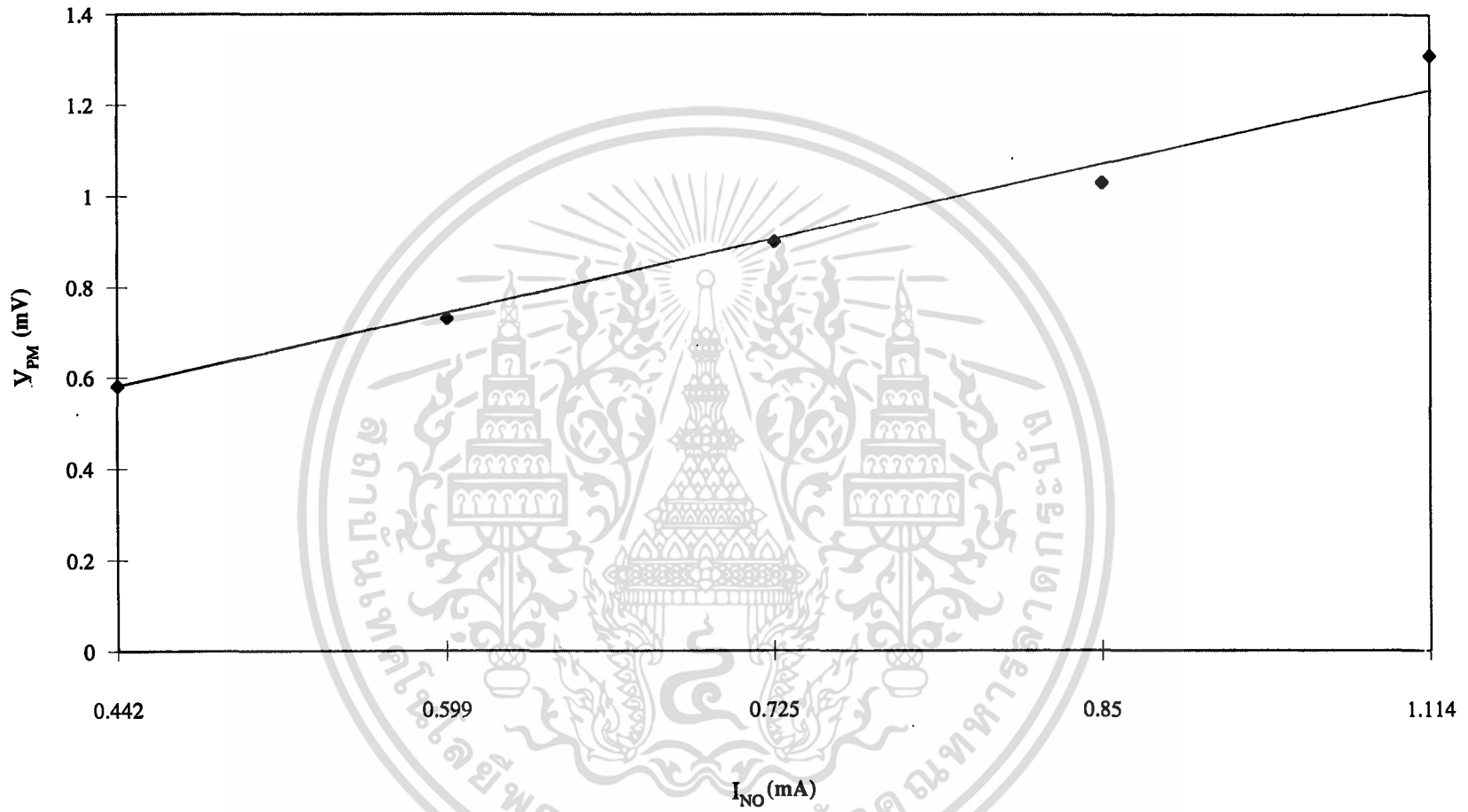
รูปที่ 3.35 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 2.9 วัตต์/ตารางเมตร



(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 2.9 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5.36 (ก) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{MN,OP}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{MN} และ V_{OP} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 530.28 วัตต์/ตารางเมตร



(ข) กราฟแสดงค่าความต้านทาน $R_{NO,PM}$ จากกราฟระหว่างค่า I_{NO} และ V_{PM} เมื่อวัดในแสงที่มีความเข้ม 530.28 วัตต์/ตารางเมตร

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผล

ในการทดลองนี้เริ่มต้นจากการปลูกผลึกเดี่ยวสารกึ่งตัวนำ CdS จากสถานะไอให้ได้ผลึก CdS ที่บริสุทธิ์ มีความสมบูรณ์ทางผลึกสูงและเป็นผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ และการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหย 1 จุดในสุญญากาศ หาชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน หาค่าคงที่และโครงสร้างของผลึกด้วยการหามุมที่เลี้ยวเบนจากระนาบผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์วัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของ CdS สภาพความต้านทานสูงโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ทำจุดสัมผัสโอห์มมิกวัดหาความสัมพันธ์ของ I-V

การปลูกผลึก CdS จากสถานะไอใช้สารตั้งต้นเป็นก้อนผลึกของสารประกอบ CdS การใช้แก๊ซอาร์กอนในการปลูกผลึก CdS จากสถานะไอ นอกจากช่วยลดปริมาณอากาศได้บางส่วนของการปลูกผลึกยังทำให้เกิดการพาไอระเหยไปตกผลึกได้ แต่ขบวนการตกผลึกส่วนใหญ่ยังคงเกิดจาก CdS ที่กลายเป็นไอแล้วไปตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำตามโปรไฟล์ของเตาที่เลื่อนไป อัตราการเลื่อนเตาหรืออัตราการลดอุณหภูมิบริเวณปลูกผลึกจะเป็นตัวกำหนดที่สำคัญต่อการปลูกผลึก การปลูกผลึกที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดผลึกเดี่ยวขนาดเล็กไปจนถึงเกิดเป็นผลึกพหุพันธ์ ดังนั้นควรปลูกผลึก CdS ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1150°C การเกิดผลึกจะทำให้มีนิวคลีโอซันที่ปลายแหลม เป็นตัวล่อผลึกให้เกิดนิวคลีโอซันเฉพาะที่และสามารถกำหนดทิศทางการเกิดระนาบของการเกิดผลึกทำให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์และมีขนาดใหญ่ถึง 1 เซนติเมตร

ในการหามุมที่เลี้ยวเบนจากระนาบผลึก CdS ด้วยรังสีเอ็กซ์ ในฟิล์มบางพบว่าผลึกมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ในระนาบ (111) ซึ่งมีเพียงระนาบของการเลี้ยวเบนเพียงระนาบเดียวผลึกที่เป็นสารตั้งต้นและผลึก CdS ที่ปลูกได้มีโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารตั้งต้น CdS คือ $a = 4.150(6)^{\circ}\text{A}$, $c = 6.368(3)^{\circ}\text{A}$ ผลึก ผลึก CdS ที่ปลูกได้ $a = 4.163(4)^{\circ}\text{A}$, $c = 6.684(5)^{\circ}\text{A}$ และฟิล์มบาง $a = 5.820(7)^{\circ}\text{A}$

การหาชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน พบว่าผลึก CdS ที่เป็นสารตั้งต้น, ฟิล์มบาง และผลึกที่ปลูกได้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นทั้งหมด

สภาพความต้านทานไฟฟ้าของผลึก CdS จากการหาด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์จะได้สภาพความต้านทานของผลึก CdS ที่ปลูกได้ในที่มีคมีค่าสูงกว่าในที่มีมีแสงสว่างมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะ

ของ CdS เมื่ออยู่ในที่มีแสงส่องสว่างจะมีสภาพความต้านทานต่ำลงทำให้ได้รับความสนใจนำมาทำเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตคิเทคเตอร์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของ I-V โดยใช้โลหะ In ทำเป็นจุดสัมผัส และแอนน็ลภายใต้บรรยากาศแก๊ซอาร์กอน ให้ In แพร่ซึมเข้าไปใน CdS กำแพงศักย์แคบลงมากพอที่กระแสจะลอดผ่านได้เนื่องจากผลึก CdS มีสภาพความต้านสูงทำให้ได้ความสัมพันธ์ I-V กระแสรีชาร์ดสันที่อุณหภูมิ 70°C, 80°C, 90°C, 100°C, และฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 100 °C

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการทดลองในต่อไป จะพัฒนาการออกแบบท่อควอทซ์ที่ใช้เป็นทางไหลของแก๊ซอาร์กอนในทางเดียวกัน เพื่อให้ได้ผลึกที่สมบูรณ์และมีขนาดใหญ่มากขึ้น เพราะเกิดนิวเคลียสเพียงจุดเดียวที่ปลายแหลมท่อควอทซ์ อัตราการเลื่อนเตาต้องช้าประมาณ 0.3 - 1.5 มิลลิเมตร / ชั่วโมง ยิ่งในช่วงขณะตกผลึกอัตราในการเลื่อนเตาต้องช้าประมาณ 0.3-0.5 มิลลิเมตร / ชั่วโมง เพิ่มการไหลของแก๊ซ H₂S เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นอะตอมของ H₂O ถูกขับออกมา ทำให้ผลึกที่ปลูกได้บริสุทธิ์ขึ้น

เอกสารอ้างอิง

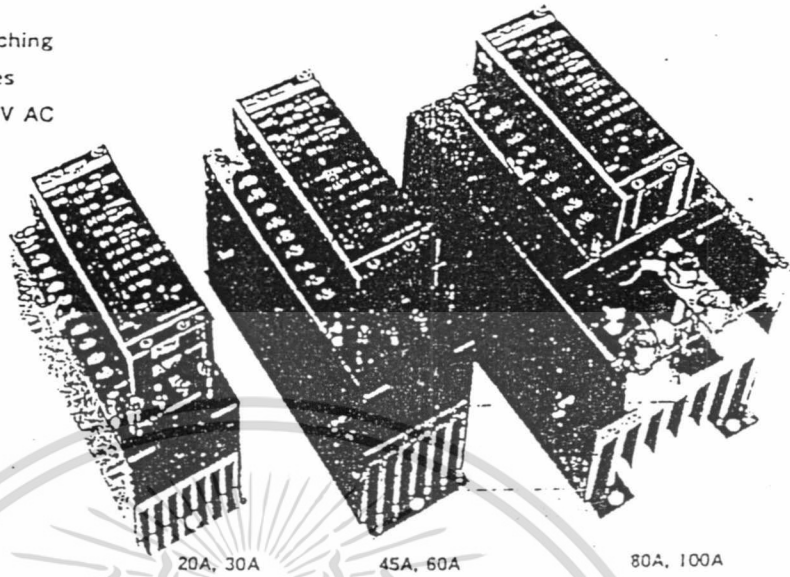
1. John Wiley, *Physics of semiconductor devices/S.M.*, 2nd ed., 1981, p.484-489.
2. W.W.Piper and S.J. Polich, "Vapor Phase Growth of Single Crystals of II - IV Compounds", *J.Appl.Phys.*, 32(7), 1961, p.1978-1979
3. ธนากร โอสถจันทร์, "การปลูกผลึกและการศึกษาคุณสมบัติบ่งชี้ของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาฟิสิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.
4. Stanislaw Ignatunvicz and Andrzej Koberdza, "Semiconducting Thinfilm of AII-BVI Componds", Chichester:Elis Horwood, 1990, p.16-18.
5. ฐิตินัย แก้วแดง, "การเตรียมผลึกและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์(CuInSe₂)", วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530 .
6. JJ Gilman, *The Art and Science of Growing Crystal*, Division of Engineering Brown University, John Wiley and Sons, Newyork Copyright, 1963
7. Clark, L. and J.Woods, "Growth of Single Crystals of Cadmium Sulphide", *J.Crystal Growth*, 4, 1968, p.126-130.
8. เกียรติศักดิ์ โพธิ์ดี, "การสร้างเตาไฟฟ้าสำหรับการปลูกผลึกอินเดียมเมอร์มาเนียมออกไซด์", โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล., 2537



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ES PAC15

- Phase Angle or Zero Voltage Switching
- Current Capacity: 20~100 Amperes
- Power Supply: 100~120/200~240V AC



SPECIFICATIONS

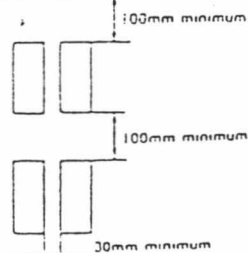
Control Mode:	Phase angle (PAC15P) Zero voltage switching (PAC15C)
Possible Loads:	All resistance loads (PAC15P) Constant resistance loads (PAC15C)
Power Supply Cycle:	50/60Hz. (internally selectable - PAC15P) 50/60Hz. common (PAC15C)
Output Voltage Control Range:	0~95% min. 50/60Hz. of input voltage (PAC15P) 0~95% min. of load power (PAC15C)
Power Lamp:	Green LED lamp (PAC15P)
Output Indication:	Green LED lamp (when load 'ON' - PAC15C)
Current Capacity:	20, 30, 45, 60, 80 and 100 Amperes.
Power Supply:	100~120V/200~240V AC $\pm 10\%$
Control Input:	Current = 4~20mA DC (Receiving impedance: 100 Ω) Contact = Zero voltage contact
Power Adjuster:	Current input = Internally standard fix (Externally fix available) Contact input = Externally standard fix
Auto/Manual Power Adjuster:	Only current input type is available - optional
Thyristor Element Cooling:	Natural air
Over-Current Protection:	None available (Use a fuse for semiconductor)
Minimum Load:	0.5 Amperes
Operating Ambient Temperature and Humidity:	-10~50°C, 90%RH max.
Insulation Resistance:	500V DC 20M Ω between power supply terminals and chassis 500V DC 20M Ω between power supply terminals and input terminals
Dielectric Strength:	One minute at 2000V AC between power supply terminal and chassis
Dimensions and Weight:	See page 123.

PAC15 Series Total Heating Value

Capacity	20A	30A	45A	60A	80A	100A
Heating Value	24W	36W	48W	60W	84W	100W

- Care must be taken for air-ventilation.
- Vertical mounting is recommended.
- When mounting horizontally, use at 70% of the current capacity.

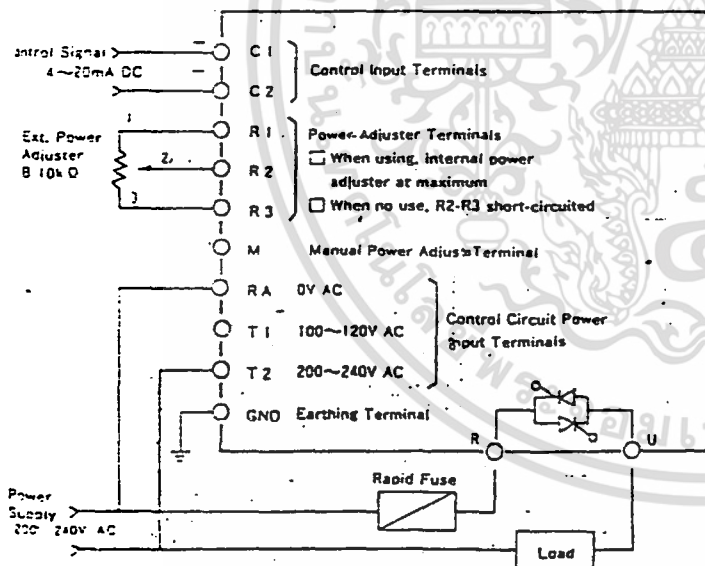
Recommended mounting



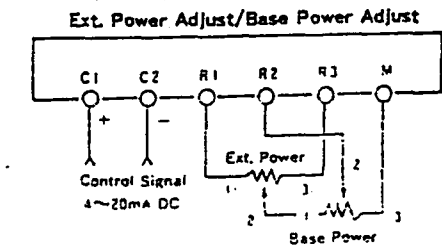
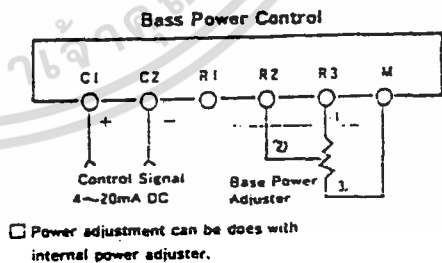
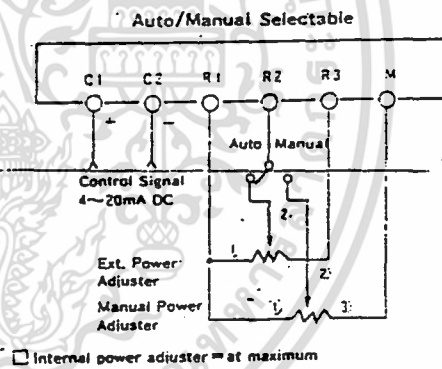
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ORDERING INFORMATION			
ITEM	CODE	SPECIFICATIONS	
SERIES	PAC 15P	Phase Angle Single Phase Power Regulator	
	PAC 15C	Zero Voltage Switching Single Phase Power Regulator	
CONTROL INPUT	0	4~20mA DC Receiving Impedance: 100Ω	
	2	Non-Voltage Contact	
	9	Others (Please consult before ordering.)	
CURRENT CAPACITY	020	20A	
	030	30A	
	045	45A	
	060	60A	
	080	80A	
	100	100A	
POWER SUPPLY	81-	100~120V/200~240V AC ±10% 50/60Hz	
	99-	Others (Please consult before ordering.)	
EXTERNAL POWER ADJUSTER	N	None (Internally standard installed)	Current Input
	P	External Power Adjuster	
	M	Manual Power Adjuster	
	B	Base Power Adjuster	
	W	External Power Adjuster + Manual Power Adjuster	Contact Input
	Y	External Power Adjuster + Base Power Adjuster	
	P	None	
	B	Base Power Adjuster	
X	Others (Please consult before ordering.)		
REMARKS	0	Without	
	9	With (Please consult before ordering.)	

TERMINAL & WIRING (CURRENT INPUT TYPE)



POWER ADJUSTER CONNECTIONS



บริษัท ว. ทวีพัฒนา จำกัด

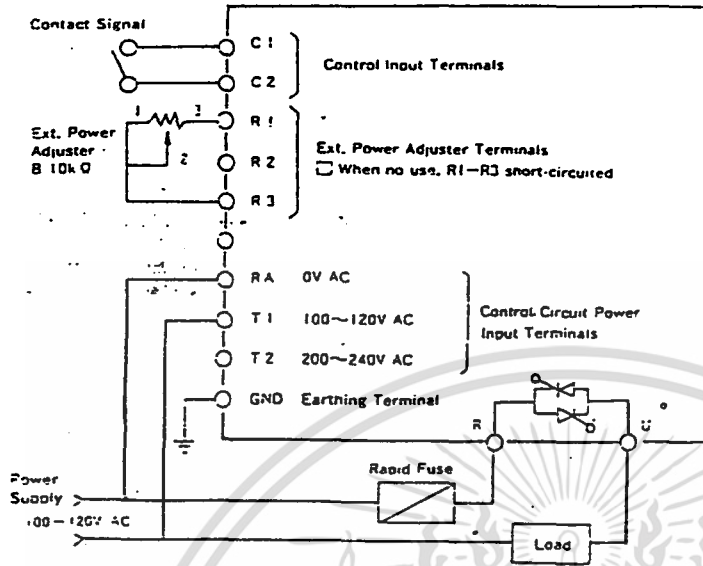
โทร. 3930930 , 3933032

FAX : (662) 3986501

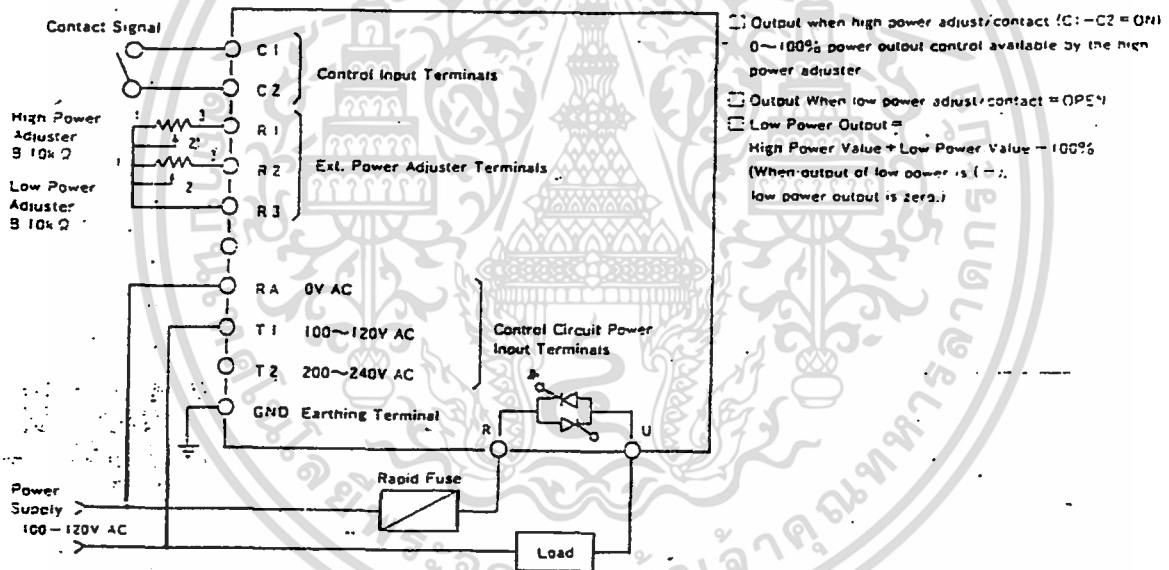
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเข้าใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TERMINAL & WIRING (CONTACT INPUT TYPE)

Normal Control



High/Low Control



CONTROL MODES & WAVE FORM

Control Mode	Item	Noise	Moving Coil Deflection	Heating Element Capacity	Output Wave Form		
					10% Output	50% Output	90% Output
Phase Angle Control (P)		Little	Continuous	Very Small			
Zero-voltage Switching Control (C)		None	• Low Output/Big Deflection • Mid ~ High Output/Almost Continuous	Small	 1 cycle ON and 9 cycle OFF	 1 cycle ON and 1 cycle OFF continuously	 9 cycle ON and 1 cycle OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CERAMIC FIBER เซรามิกไฟเบอร์

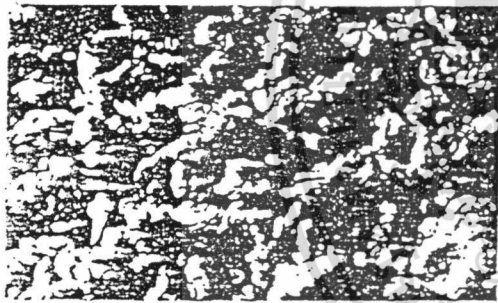


Ceramic Fiber เป็นฉนวนชนิดใหม่ใช้สำหรับ งานที่มีปัญหาหรือต้องเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูงมาก ๆ เช่น งานหลอมโลหะ งานเชื่อมโลหะ Ceramic Fiber จะช่วยป้องกันชิ้นส่วนต่าง ๆ จากความร้อนสูง หรือป้องกันความร้อนภายในเตาเผาไม่ให้รั่วไหลได้ ซึ่งจะเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงอีกด้วย

Ceramic Fiber เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเป็นพิเศษมีความยืดหยุ่นสูงสามารถโค้งงอได้ถึง 180° มีค่านำความร้อนที่ต่ำมาก สามารถตัดให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วโดยเพียงแต่ใช้มีด หรือกรรไกรเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

■ ชนิดของการใช้งาน

- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนรั่วไหลในตู้อบหรือเตาเผา
- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนให้กับท่อ
- ใช้ควบคุมแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์
- ใช้ป้องกันแก๊สในเตาหลอมโลหะโดยการหุ้มไว้ภายใน
- ใช้เป็นปะเก็น และซีล
- ใช้หุ้มบริเวณข้อต่อที่มีการขยายตัว
- ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนของหม้อน้ำหรือเครื่องจักรไอน้ำ (Turbine)
- ช่วยลดแรงเค้นในการเชื่อมและเป็นฉนวนกันความร้อนเวลาเชื่อม
- ใช้บุผนังห้องเพื่อป้องกันไฟไหม้



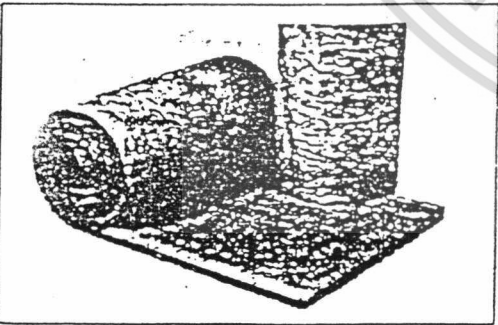
■ BULK แบบเป็นก้อนเหมือนลำลี

■ CERAMIC BULK FIBER

ทำขึ้นจาก Fiber ที่มีขนาดยาวมาก มีความยืดหยุ่นสูง สามารถคืนตัวได้ดี ถึงแม้จะโดนแรงอัดอย่างหนักก็สามารถกลับคืนรูปเดิมได้ มีน้ำหนักเบา และมีค่านำความร้อนที่ต่ำ มีค่าความหนาแน่นคงที่ (0.06 - 0.20 g / cm³) นำไปใช้งานได้ง่ายโดยเพียงแต่ตั้ง หรือตัดออกก็ได้ ขนาดบรรจุ 5 กก. และ 20 กก. / กล่อง

■ CERAMIC BLANKET

Ceramic Blanket ทำขึ้นจาก Ceramic Fiber มีความยืดหยุ่นสูงมีน้ำหนักเบาเพียง 1/6 ของอิฐป้องกันความร้อน (Insulating Firebrick) เท่านั้น มีลักษณะเป็นผืนผ้าม้วนอยู่บนแกนกระดาษ สามารถนำ ใช้บุเป็นผนังกันความร้อนรั่วไหลภายในตู้อบเตาเผาหรือเตาหลอมโลหะได้เป็นอย่างดี



■ BLANKET แบบเป็นผืน

Ceramic Fiber เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่ติดไฟมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำและมีค่าความต้านทานความร้อนที่ดีมาก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาสำหรับอุณหภูมิตั้งแต่ 1260 °C, 1400 °C, 1500 °C และ 1600 °C (1600 °C จะมีส่วนผสมของ Saffron อยู่ด้วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS												
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.021	0.027	0.032	0.038	0.043	0.049	0.054	0
10	0.054	0.060	0.065	0.071	0.077	0.082	0.088	0.094	0.100	0.105	0.111	10
20	0.111	0.117	0.123	0.129	0.135	0.141	0.147	0.152	0.158	0.165	0.171	20
30	0.171	0.177	0.183	0.189	0.195	0.201	0.207	0.214	0.220	0.226	0.232	30
40	0.232	0.239	0.245	0.251	0.258	0.264	0.271	0.277	0.283	0.290	0.296	40
50	0.296	0.303	0.310	0.316	0.323	0.329	0.336	0.343	0.349	0.356	0.363	50
60	0.363	0.369	0.376	0.383	0.390	0.397	0.403	0.410	0.417	0.424	0.431	60
70	0.431	0.438	0.445	0.452	0.459	0.466	0.473	0.480	0.487	0.494	0.501	70
80	0.501	0.508	0.515	0.523	0.530	0.537	0.544	0.552	0.559	0.566	0.573	80
90	0.573	0.581	0.588	0.595	0.603	0.610	0.617	0.625	0.632	0.640	0.647	90
100	0.647	0.655	0.662	0.670	0.677	0.685	0.692	0.700	0.708	0.715	0.723	100
110	0.723	0.730	0.738	0.746	0.754	0.761	0.769	0.777	0.784	0.792	0.800	110
120	0.800	0.808	0.816	0.824	0.831	0.839	0.847	0.855	0.863	0.871	0.879	120
130	0.879	0.887	0.895	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.943	0.951	0.959	130
140	0.959	0.967	0.975	0.983	0.992	1.000	1.008	1.016	1.024	1.032	1.041	140
150	1.041	1.049	1.057	1.065	1.074	1.082	1.090	1.099	1.107	1.115	1.124	150
160	1.124	1.132	1.140	1.149	1.157	1.166	1.174	1.183	1.191	1.200	1.208	160
170	1.208	1.217	1.225	1.234	1.242	1.251	1.259	1.268	1.276	1.285	1.294	170
180	1.294	1.302	1.311	1.319	1.328	1.337	1.345	1.354	1.363	1.372	1.380	180
190	1.380	1.389	1.398	1.407	1.415	1.424	1.433	1.442	1.450	1.459	1.468	190
200	1.468	1.477	1.486	1.495	1.504	1.512	1.521	1.530	1.539	1.548	1.557	200
210	1.557	1.566	1.575	1.584	1.593	1.602	1.611	1.620	1.629	1.638	1.647	210
220	1.647	1.656	1.665	1.674	1.683	1.692	1.702	1.711	1.720	1.729	1.738	220
230	1.738	1.747	1.756	1.766	1.775	1.784	1.793	1.802	1.812	1.821	1.830	230
240	1.830	1.839	1.849	1.858	1.867	1.876	1.886	1.895	1.904	1.914	1.923	240
250	1.923	1.932	1.942	1.951	1.960	1.970	1.979	1.988	1.998	2.007	2.017	250
260	2.017	2.026	2.036	2.045	2.054	2.064	2.073	2.083	2.092	2.102	2.111	260
270	2.111	2.121	2.130	2.140	2.149	2.159	2.169	2.178	2.188	2.197	2.207	270
280	2.207	2.216	2.226	2.236	2.245	2.255	2.264	2.274	2.284	2.293	2.303	280
290	2.303	2.313	2.322	2.332	2.342	2.351	2.361	2.371	2.381	2.390	2.400	290
300	2.400	2.410	2.420	2.429	2.439	2.449	2.459	2.468	2.478	2.488	2.498	300
310	2.498	2.508	2.517	2.527	2.537	2.547	2.557	2.567	2.577	2.586	2.596	310
320	2.596	2.606	2.616	2.626	2.635	2.645	2.655	2.665	2.676	2.685	2.695	320
330	2.695	2.705	2.715	2.725	2.735	2.745	2.755	2.765	2.775	2.785	2.795	330
340	2.795	2.805	2.815	2.825	2.835	2.845	2.855	2.866	2.876	2.886	2.896	340
350	2.896	2.906	2.916	2.926	2.936	2.946	2.956	2.966	2.977	2.987	2.997	350
360	2.997	3.007	3.017	3.027	3.037	3.048	3.058	3.068	3.078	3.088	3.099	360
370	3.099	3.109	3.119	3.129	3.139	3.150	3.160	3.170	3.180	3.191	3.201	370
380	3.201	3.211	3.221	3.232	3.242	3.252	3.263	3.273	3.283	3.293	3.304	380
390	3.304	3.314	3.324	3.335	3.345	3.355	3.366	3.376	3.386	3.397	3.407	390
400	3.407	3.418	3.428	3.438	3.449	3.459	3.470	3.480	3.490	3.501	3.511	400
410	3.511	3.522	3.532	3.543	3.553	3.563	3.574	3.584	3.595	3.605	3.616	410
420	3.616	3.626	3.637	3.647	3.658	3.668	3.679	3.689	3.700	3.710	3.721	420
430	3.721	3.731	3.742	3.752	3.763	3.774	3.784	3.795	3.805	3.816	3.826	430
440	3.826	3.837	3.848	3.858	3.869	3.879	3.890	3.901	3.911	3.922	3.933	440
450	3.933	3.943	3.954	3.964	3.975	3.986	3.996	4.007	4.018	4.028	4.039	450
460	4.039	4.050	4.061	4.071	4.082	4.093	4.103	4.114	4.125	4.136	4.146	460
470	4.146	4.157	4.168	4.178	4.189	4.200	4.211	4.222	4.232	4.243	4.254	470
480	4.254	4.265	4.275	4.286	4.297	4.308	4.319	4.329	4.340	4.351	4.362	480
490	4.362	4.373	4.384	4.394	4.405	4.416	4.427	4.438	4.449	4.460	4.471	490
500	4.471	4.481	4.492	4.503	4.514	4.525	4.536	4.547	4.558	4.569	4.580	500
510	4.580	4.591	4.601	4.612	4.623	4.634	4.645	4.656	4.667	4.678	4.689	510
520	4.689	4.700	4.711	4.722	4.733	4.744	4.755	4.766	4.777	4.788	4.799	520
530	4.799	4.810	4.821	4.832	4.843	4.854	4.865	4.876	4.888	4.899	4.910	530
540	4.910	4.921	4.932	4.943	4.954	4.965	4.976	4.987	4.998	5.009	5.021	540
550	5.021	5.032	5.043	5.054	5.065	5.076	5.087	5.099	5.110	5.121	5.132	550
560	5.132	5.143	5.154	5.166	5.177	5.188	5.199	5.210	5.221	5.233	5.244	560
570	5.244	5.255	5.266	5.278	5.289	5.300	5.311	5.322	5.334	5.345	5.356	570
580	5.356	5.368	5.379	5.390	5.401	5.413	5.424	5.435	5.446	5.458	5.469	580
590	5.469	5.480	5.492	5.503	5.514	5.526	5.537	5.548	5.560	5.571	5.582	590
600	5.582	5.594	5.605	5.616	5.628	5.639	5.650	5.662	5.673	5.685	5.696	600
610	5.696	5.707	5.719	5.730	5.742	5.753	5.764	5.776	5.787	5.799	5.810	610
620	5.810	5.821	5.833	5.844	5.856	5.867	5.879	5.890	5.902	5.913	5.925	620
630	5.925	5.936	5.948	5.959	5.971	5.982	5.994	6.005	6.017	6.028	6.040	630
640	6.040	6.051	6.063	6.074	6.086	6.098	6.109	6.121	6.132	6.144	6.155	640
650	6.155	6.167	6.179	6.190	6.202	6.213	6.225	6.237	6.248	6.260	6.272	650
660	6.272	6.283	6.295	6.307	6.318	6.330	6.342	6.353	6.365	6.377	6.388	660
670	6.388	6.400	6.412	6.423	6.435	6.447	6.458	6.470	6.482	6.494	6.505	670
680	6.505	6.517	6.529	6.541	6.552	6.564	6.576	6.588	6.599	6.611	6.623	680
690	6.623	6.635	6.647	6.658	6.670	6.682	6.694	6.706	6.718	6.729	6.741	690
700	6.741	6.753	6.765	6.777	6.789	6.800	6.812	6.824	6.836	6.848	6.860	700
710	6.860	6.872	6.884	6.895	6.907	6.919	6.931	6.943	6.955	6.967	6.979	710
720	6.979	6.991	7.003	7.015	7.027	7.039	7.051	7.063	7.074	7.086	7.098	720
730	7.098	7.110	7.122	7.134	7.146	7.158	7.170	7.182	7.194	7.206	7.218	730
740	7.218	7.231	7.243	7.255	7.267	7.279	7.291	7.303	7.315	7.327	7.339	740
750	7.339	7.351	7.363	7.375	7.387	7.399	7.412	7.424	7.436	7.448	7.460	750
760	7.460	7.472	7.484	7.496	7.509	7.521	7.533	7.545	7.557	7.569	7.582	760
770	7.582	7.594	7.606	7.618	7.630	7.642	7.655	7.667	7.679	7.691	7.703	770
780	7.703	7.716	7.728	7.740	7.752	7.765	7.777	7.789	7.801	7.814	7.826	780
790	7.826	7.838	7.850	7.863	7.875	7.887	7.900	7.912	7.924	7.937	7.949	790
800	7.949	7.961	7.973	7.986	7.998	8.010	8.023	8.035	8.047	8.060	8.072	800
810	8.072	8.085	8.097	8.109	8.122	8.134	8.146	8.159	8.171	8.184	8.196	810
820	8.196	8.208	8.221	8.233	8.246	8.258	8.271	8.283	8.295	8.308	8.320	820
830	8.320	8.333	8.345	8.358	8.370	8.383	8.395	8.408	8.420	8.433	8.445	830
840	8.445	8.458	8.470	8.483	8.495	8.508	8.520	8.533	8.545	8.558	8.570	840
850	8.570	8.583	8.595	8.608	8.621	8.633	8.646	8.658	8.671	8.683	8.696	850
860	8.696	8.709	8.721	8.734	8.746	8.759	8.772	8.784	8.797	8.810	8.822	860
870	8.822	8.835	8.847	8.860	8.873	8.885	8.898	8.911	8.923	8.936	8.949	870
880	8.949	8.961	8.974	8.987	9.000	9.012	9.025	9.038	9.050	9.063	9.076	880
890	9.076	9.089	9.101	9.114	9.127	9.140	9.152	9.165	9.178	9.191	9.203	890

TYPE R

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานานาชาติฯ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาต
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEG C 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 DEG C

THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS

90C	9.207	9.216	9.226	9.234	9.254	9.267	9.280	9.294	9.306	9.314	9.331	90C
91C	9.331	9.340	9.350	9.357	9.377	9.389	9.406	9.421	9.434	9.447	9.460	91C
92C	9.461	9.471	9.485	9.494	9.511	9.524	9.537	9.550	9.563	9.576	9.589	92C
93C	9.598	9.607	9.614	9.627	9.640	9.655	9.666	9.679	9.692	9.705	9.718	93C
94C	9.716	9.731	9.744	9.757	9.770	9.783	9.796	9.809	9.822	9.835	9.846	94C
95C	9.848	9.861	9.874	9.887	9.900	9.913	9.926	9.939	9.952	9.965	9.978	95C
96C	9.978	9.991	10.004	10.017	10.030	10.043	10.056	10.069	10.082	10.095	10.109	96C
97C	10.109	10.122	10.135	10.148	10.161	10.174	10.187	10.200	10.213	10.227	10.240	97C
98C	10.240	10.253	10.266	10.279	10.292	10.305	10.319	10.332	10.345	10.358	10.371	98C
99C	10.371	10.384	10.398	10.411	10.424	10.437	10.450	10.464	10.477	10.490	10.503	99C
1.00C	10.503	10.516	10.530	10.543	10.556	10.569	10.583	10.596	10.609	10.622	10.636	1.00C
1.01C	10.636	10.649	10.662	10.675	10.689	10.702	10.715	10.729	10.742	10.755	10.768	1.01C
1.02C	10.768	10.781	10.795	10.808	10.822	10.835	10.848	10.862	10.875	10.888	10.902	1.02C
1.03C	10.902	10.915	10.928	10.942	10.955	10.968	10.982	10.995	11.009	11.022	11.035	1.03C
1.04C	11.035	11.048	11.062	11.076	11.089	11.102	11.116	11.129	11.143	11.156	11.170	1.04C
1.05C	11.170	11.183	11.196	11.210	11.223	11.237	11.250	11.264	11.277	11.291	11.304	1.05C
1.06C	11.304	11.317	11.331	11.345	11.358	11.372	11.385	11.399	11.412	11.426	11.439	1.06C
1.07C	11.439	11.453	11.466	11.480	11.493	11.507	11.520	11.534	11.547	11.561	11.574	1.07C
1.08C	11.574	11.588	11.602	11.615	11.629	11.642	11.656	11.669	11.683	11.697	11.710	1.08C
1.09C	11.710	11.724	11.737	11.751	11.765	11.778	11.792	11.805	11.819	11.833	11.846	1.09C
1.10C	11.846	11.860	11.874	11.887	11.901	11.914	11.928	11.942	11.955	11.969	11.983	1.10C
1.11C	11.983	11.996	12.010	12.024	12.037	12.051	12.065	12.078	12.092	12.106	12.119	1.11C
1.12C	12.119	12.133	12.147	12.161	12.174	12.188	12.202	12.215	12.229	12.243	12.257	1.12C
1.13C	12.257	12.270	12.284	12.298	12.311	12.325	12.339	12.353	12.366	12.380	12.394	1.13C
1.14C	12.394	12.408	12.421	12.435	12.449	12.463	12.476	12.490	12.504	12.518	12.532	1.14C
1.15C	12.532	12.545	12.559	12.573	12.587	12.600	12.614	12.628	12.642	12.656	12.669	1.15C
1.16C	12.669	12.683	12.697	12.711	12.725	12.739	12.752	12.766	12.780	12.794	12.808	1.16C
1.17C	12.808	12.822	12.835	12.849	12.863	12.877	12.891	12.905	12.919	12.932	12.946	1.17C
1.18C	12.946	12.960	12.974	12.988	13.002	13.016	13.029	13.043	13.057	13.071	13.085	1.18C
1.19C	13.085	13.099	13.113	13.127	13.140	13.154	13.168	13.182	13.196	13.210	13.224	1.19C
1.20C	13.224	13.238	13.252	13.266	13.280	13.293	13.307	13.321	13.335	13.349	13.363	1.20C
1.21C	13.363	13.377	13.391	13.405	13.419	13.433	13.447	13.461	13.475	13.489	13.502	1.21C
1.22C	13.502	13.516	13.530	13.544	13.558	13.572	13.586	13.600	13.614	13.628	13.642	1.22C
1.23C	13.642	13.656	13.670	13.684	13.698	13.712	13.726	13.740	13.754	13.768	13.782	1.23C
1.24C	13.782	13.796	13.810	13.824	13.838	13.852	13.866	13.880	13.894	13.908	13.922	1.24C
1.25C	13.922	13.936	13.950	13.964	13.978	13.992	14.006	14.020	14.034	14.048	14.062	1.25C
1.26C	14.062	14.076	14.090	14.104	14.118	14.132	14.146	14.160	14.174	14.188	14.202	1.26C
1.27C	14.202	14.216	14.230	14.244	14.258	14.272	14.286	14.300	14.314	14.328	14.342	1.27C
1.28C	14.342	14.356	14.370	14.384	14.398	14.412	14.426	14.440	14.454	14.468	14.482	1.28C
1.29C	14.482	14.496	14.510	14.524	14.538	14.552	14.566	14.580	14.594	14.608	14.622	1.29C
1.30C	14.622	14.636	14.650	14.664	14.678	14.692	14.706	14.720	14.734	14.748	14.762	1.30C
1.31C	14.762	14.776	14.790	14.804	14.818	14.832	14.846	14.860	14.874	14.888	14.902	1.31C
1.32C	14.902	14.916	14.930	14.944	14.958	14.972	14.986	14.999	15.013	15.027	15.041	1.32C
1.33C	15.041	15.055	15.069	15.083	15.097	15.111	15.125	15.139	15.153	15.167	15.181	1.33C
1.34C	15.181	15.195	15.209	15.223	15.237	15.251	15.265	15.279	15.293	15.307	15.321	1.34C
1.35C	15.321	15.335	15.349	15.363	15.377	15.391	15.405	15.419	15.433	15.447	15.461	1.35C
1.36C	15.461	15.475	15.489	15.503	15.517	15.531	15.545	15.559	15.573	15.587	15.601	1.36C
1.37C	15.601	15.615	15.629	15.643	15.657	15.671	15.685	15.699	15.713	15.727	15.741	1.37C
1.38C	15.741	15.755	15.769	15.783	15.797	15.811	15.825	15.839	15.853	15.867	15.881	1.38C
1.39C	15.881	15.895	15.909	15.923	15.937	15.951	15.965	15.979	15.993	16.007	16.021	1.39C
1.40C	16.021	16.035	16.049	16.063	16.077	16.091	16.105	16.119	16.133	16.147	16.161	1.40C
1.41C	16.161	16.175	16.189	16.203	16.217	16.231	16.245	16.259	16.273	16.287	16.301	1.41C
1.42C	16.301	16.315	16.329	16.343	16.357	16.371	16.385	16.399	16.413	16.427	16.441	1.42C
1.43C	16.441	16.455	16.469	16.483	16.497	16.511	16.525	16.539	16.553	16.567	16.581	1.43C
1.44C	16.581	16.595	16.609	16.623	16.637	16.651	16.665	16.679	16.693	16.707	16.721	1.44C
1.45C	16.721	16.735	16.749	16.763	16.777	16.791	16.805	16.819	16.833	16.847	16.861	1.45C
1.46C	16.861	16.875	16.889	16.903	16.917	16.931	16.945	16.959	16.973	16.987	17.001	1.46C
1.47C	17.001	17.015	17.029	17.043	17.057	17.071	17.085	17.099	17.113	17.127	17.141	1.47C
1.48C	17.141	17.155	17.169	17.183	17.197	17.211	17.225	17.239	17.253	17.267	17.281	1.48C
1.49C	17.281	17.295	17.309	17.323	17.337	17.351	17.365	17.379	17.393	17.407	17.421	1.49C
1.50C	17.421	17.435	17.449	17.463	17.477	17.491	17.505	17.519	17.533	17.547	17.561	1.50C
1.51C	17.561	17.575	17.589	17.603	17.617	17.631	17.645	17.659	17.673	17.687	17.701	1.51C
1.52C	17.701	17.715	17.729	17.743	17.757	17.771	17.785	17.799	17.813	17.827	17.841	1.52C
1.53C	17.841	17.855	17.869	17.883	17.897	17.911	17.925	17.939	17.953	17.967	17.981	1.53C
1.54C	17.981	17.995	18.009	18.023	18.037	18.051	18.065	18.079	18.093	18.107	18.121	1.54C
1.55C	18.121	18.135	18.149	18.163	18.177	18.191	18.205	18.219	18.233	18.247	18.261	1.55C
1.56C	18.261	18.275	18.289	18.303	18.317	18.331	18.345	18.359	18.373	18.387	18.401	1.56C
1.57C	18.401	18.415	18.429	18.443	18.457	18.471	18.485	18.499	18.513	18.527	18.541	1.57C
1.58C	18.541	18.555	18.569	18.583	18.597	18.611	18.625	18.639	18.653	18.667	18.681	1.58C
1.59C	18.681	18.695	18.709	18.723	18.737	18.751	18.765	18.779	18.793	18.807	18.821	1.59C
1.60C	18.821	18.835	18.849	18.863	18.877	18.891	18.905	18.919	18.933	18.947	18.961	1.60C
1.61C	18.961	18.975	18.989	19.003	19.017	19.031	19.045	19.059	19.073	19.087	19.101	1.61C
1.62C	19.101	19.115	19.129	19.143	19.157	19.171	19.185	19.199	19.213	19.227	19.241	1.62C
1.63C	19.241	19.255	19.269	19.283	19.297	19.311	19.325	19.339	19.353	19.367	19.381	1.63C
1.64C	19.381	19.395	19.409	19.423	19.437	19.451	19.465	19.479	19.493	19.507	19.521	1.64C
1.65C	19.521	19.535	19.549	19.563	19.577	19.591	19.605	19.619	19.633	19.647	19.661	1.65C
1.66C	19.661	19.675	19.689	19.703	19.717	19.731	19.745	19.759	19.773	19.787	19.801	1.66C
1.67C	19.801	19.815	19.829	19.843	19.857	19.871	19.885	19.899	19.913	19.927	19.941	1.67C
1.68C	19.941	19.955	19.969	19.983	19.997	20.011	20.025	20.039	20.053	20.067	20.081	1.68C
1.69C	20.081	20.095	20.109	20.123	20.137	20.151	20.165	20.179	20.193	20.207	20.221	1.69C
1.70C	20.221	20.235	20.249	20.263	20.277	20.291	20.305	20.319	20.333	20.347	20.361	1.70C
1.71C	20.361	20.375	20.389	20.403	20.417	20.431	20.445	20.459	20.473	20.487	20.501	1.71C
1.72C	20.501	20.515	20.529	20.543	20.557	20.571	20.585	20.599	20.613	20.627	20.641	1.72C
1.73C	20.641	20.655	20.669	20.683	20.697	20.711	20.725	20.739	20.753	20.767	20.781	1.73C
1.74C	20.781	20.795	20.809	20.823	20.837	2						



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6-0314 MAJOR CORRECTION

d	3.16	3.58	3.36	3.58	CdS					
I/I ₁	100	75	60	75	CADMIUM SULFIDE (GREENOCKITE)					
					d Å	I/I ₁	hkl	d Å	I/I ₁	hkl
Red. CuKα	λ 1.5405	Filter Ni			3.58	75	100	1.1249	8	302
Dia.	Cut off	Cell			3.36	60	002	1.0743	8	305
I/I ₁	DIFFRACTOMETER	d corr. abs.?			3.16	100	101	1.0540	2	214
Ref.	NBS CIRCULAR 539 VOL. IV PP 15-16 (1955)				2.450	25	102	1.0540	4	220
					2.068	55	110	0.9934	4	310
Sys.	HEXAGONAL	S.G.	P6 ₃ mc (186)		1.898	40	103	.9881	6	222
a	4.136	b	c 6.713	A	1.791	18	200	.9842	6	116
α	β	γ	Z	2	1.761	45	112	.9827	6	311
Ref.	IBID.				1.731	18	201	.9729	2	304
					1.679	4	004	.9533	10	215, 312
ε	n	β	2.506	γ	2.529	Sign	+			
SV	D 4.82	mp			1.581	8	202	.9265	2	107
Ref.	DANA'S SYSTEM OF MINERALOGY 7TH ED., VOL. 1				1.520	2	104	.9081	8	313
					1.398	16	203	.8956	2	400
SAMPLE	FROM R.C.A. SPECT. ANALYSIS	<0.01%			1.3536	6	210	.8878	2	401
AL.	B, Fe, Mg, Si	<0.001%	Ca, Cu.		1.3271	12	211	.8804	4	224
X-RAY	PATTERN	AT 25°C.			1.3032	8	114	.8653	4	102
THE	SAMPLE	WAS HEATED	AT 400°C FOR 30 HOURS	IN	1.2572	12	105	.8624	4	216
5	ATMOS.	TO ELIMINATE	CUBIC PHASE.		1.2247	2	204	.8315	4	403
					1.1940	8	300	.8166	4	306
					1.1855	12	213	.8158	4	321

10-454 MINOR CORRECTION

d	3.36	2.06	1.75	3.36	β-CdS			β-CdS		
I/I ₁	100	60	60	100	BETA CADMIUM SULFIDE			HAWLEYITE		
					d Å	I/I ₁	hkl	d Å	I/I ₁	hkl
Red. CuKα	λ 1.5418	Filter Ni			3.36	100	111			
Cut off	I/I ₁ VISUAL				2.90	40	200			
Ref.	TRAILL AND BOYLE, AM. MIN. 40 55 (1955)				2.058	80	220			
					1.753	60	311			
Sys.	CUBIC	S.G.	T _D ² - F ₄₃₂ (216)		1.680	10	222			
a	5.818	b	c	A	1.453	20	400			
α	β	γ	Z	4	1.337	30	331			
Ref.	IBID.				1.298	10	420			
					1.186	30	422			
ε	n	β	γ	Sign	1.120	30	333, 511			
ZV	D	mp		Color	1.028	5	440			
Ref.	IBID.				0.985	20	531			
					.918	5	620			
SAMPLE	FROM HECTOR-CALUMNET MINE, GALENS HILL, YUKON.				.887	5	533			
YELLOW	COATING	ON SPHALERITE	AND SIDERITE.							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวธิดิมา นาครินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม พุทธศักราช 2516 ที่จังหวัดสุรินทร์ โดยสำเร็จการศึกษาในระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสันติราษฎร์วิทยาลัย และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ปีการศึกษา 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้