

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ฟิล์มบาง CuInSe_2 จากการระเหยสาร 1 จุด ความคมโดยไอบีเอ็ม พีซี



๑/๗
๗๗๕๘/๗
๒๕๓๔

นางสาวพัลลภา ศรีสุกใส
นายพรชัย จรัสสุนทรวงศ์

เลขหมู่
เลขทะเบียน
วันเดือนปี

.6125218A X

ปัญหา/โครงการพิเศษที่เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๓๔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CuInSe₂-Thin film from 1 source evaporation controlled
by IBM PC**



**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**

1991

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ฟิล์มบาง CuInSe_2 จากการระเหยสาร

โดย

1 จุด ความคุมโดยไอบีเอ็ม พีซี

ภาควิชา

นางสาวพัลลภา ศรีสุกใส

อาจารย์ที่ปรึกษา

นายพรชัย จรัสสุนทรวงศ์

ฟิลิกส์ประยุกต์

อ. จิติ หนูแก้ว

อ. อนุพงศ์ สรงประภา

ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต

ภาควิชาฟิลิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต) หัวหน้าภาควิชาฟิลิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

.....
(อ. อนุชิต จารุนาวัฒน์) ประธานกรรมการ

.....
(อ. จิติ หนูแก้ว) กรรมการ

.....
(อ. อนุพงศ์ สรงประภา) กรรมการ

.....
(ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต) กรรมการ

.....
(อ. วิษัญญู กกกนทา) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิลิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ฟิล์มบาง CuInSe_2 โดยการระเหยสาร
นักศึกษา	1 จุด ควบคุมโดย ไอปีเอ็ม พีซี นางสาวพัลลภา ศรีสุกใส นายพรชัย จรัสสุนทรวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ. จิติ หนูแก้ว อ. อนุพงศ์ สรงประภา ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต ฟิลิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิลิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2534

บทคัดย่อ

CuInSe_2 เป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ โครงการพิเศษนี้ เริ่มต้นจากการเตรียมสารโดยเตรียมแผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 จากการระเหยสาร 1 จุด โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาทำการแอนนัลและศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธี X-Ray Diffraction และขนาดของเกรนโดยวิธี Scanning Electron Microscope ผลจากการวิเคราะห์จะพบว่า โครงสร้างผลึกมีลักษณะเป็นแบบซาลโคไทไรท์ มีค่าคงที่แลตทิส (a) เท่ากับ 5.633 อังสตรอม (Å) และ ขนาดของเกรนเท่ากับ 4.91

Special Project Title CuInSe_2 -Thin Film from 1 source
 evaporation controlled by IBM PC
 Name Miss Panlapa Srisogsai
 Mr. Pornchai Jaratsunthonwong
 Special Project Advisor Mr.Jiti Nukeaw
 Mr.Anupong Srongprapa
 Dr.Sanay Akavipat
 Department Applied Physics
 Academic Year 1991

Abstract

CuInSe_2 compound has a semiconductor property that can apply to be the electronic devices, such as solar cells. In this special project, CuInSe_2 -thin film prepares from 1 source which is controlled by the microcomputer system. After evaporation the film is annealed and its crystal structure is determined by X-Ray diffraction method. The determination of the grain size is studied by scanning electron microscope. The results show that the crystal structure of CuInSe_2 -thin film is charlcopyrite-type with the lattice constant of 5.633 angstroms (\AA) and the grain size is 4.91

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญรูป.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	3
2.1 สารกึ่งตัวนำ.....	3
2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	16
2.3 ผิวหน้าของผลึก.....	26
บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสาร.....	37
3.1 ระบบวัดความหนาและควบคุมการระเหยสาร.....	37
3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ.....	42
3.3 ระบบแอนนูลัสสาร.....	45
บทที่ 4 การเตรียมสารประกอบ $CuInSe_2$ และการวิเคราะห์แผ่นฟิล์ม...	46
4.1 การเตรียมสารประกอบ $CuInSe_2$	46
4.2 เจือไนซ์ของฟิล์ม.....	49
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยวิธี	
X-Ray Diffraction.....	52
4.4 การวัดค่าขนาดของเกรนโดยวิธี Scanning	
Electron Microscope.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังกระดานวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1	สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	61

ภาคผนวก ก อัตราส่วนของมวลของ Cu:In:Se

ภาคผนวก ข ระบบควบคุมการระเหยสารโดยคอมพิวเตอร์

ภาคผนวก ค ASTM DATA CARD

ภาคผนวก ง รายละเอียดการคำนวณค่าคงที่ของแลททิซ

เอกสารอ้างอิง

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แผนภาพแสดงสัดส่วนสำหรับองค์ประกอบสำหรับสาร.....	5
รูปที่ 2.2	แสดงเวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้ง 3 ชนิด....	6
รูปที่ 2.3	แสดงรูปทรงเรขาคณิต 3 มิติของแลตทิซทั้ง 14 แบบ.....	8
รูปที่ 2.4	แสดงจุดตัดบนระนาบบนแกนทั้ง 3 ของระนาบ (233).....	9
รูปที่ 2.5	แสดงระนาบที่สำคัญบางระนาบของผลึกคิวบิก.....	10
รูปที่ 2.6	แสดงโครงสร้างลักษณะพันธะ 4 หน้า.....	11
รูปที่ 2.7	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	12
รูปที่ 2.8	แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลน.....	13
รูปที่ 2.9	แสดงโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์.....	15
รูปที่ 2.10	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตาม เงื่อนไขของแบรกก์.....	17
รูปที่ 2.11	แสดงหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	23
รูปที่ 2.12	แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโต มิเตอร์.....	24
รูปที่ 2.13	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่องดิฟแฟรคโต มิเตอร์.....	25
รูปที่ 2.14	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่องดิฟแฟรคโต มิเตอร์.....	25
รูปที่ 2.15	กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนหรือ SEM.....	26
รูปที่ 2.16	ส่วนประกอบต่างๆรวมทั้งระบบภายใน column และ console unit ของ SEM.....	28
รูปที่ 2.17	แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็น จุดกำเนิดของภาพ.....	29
รูปที่ 2.18	ภาพแสดงความสัมพันธ์ของโครงสร้างสารพหุผลึกแบบ 2 มิติ ไปยังเส้นโครงสร้าง 3 มิติ เฉพาะส่วนของ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ปริมาตรโดยรวมของเกรน 1 เกรน.....	35
รูปที่ 2.19	แสดงบางตัวอย่างของขนาดเกรนสำหรับตัวอย่างที่เป็นแผ่นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ.....	36
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงระบบวัดความหนาและควบคุมการระเหยสารโดยใช้คอมพิวเตอร์.....	40
รูปที่ 3.2	ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ.....	41
รูปที่ 3.3	ลักษณะฐานของแผ่นรองรับ.....	43
รูปที่ 3.4	ระบบแอนนูลีสาร.....	44
รูปที่ 4.1	ระบบระเหยสาร.....	47
รูปที่ 4.2	เครื่อง X-Ray Diffractometer.....	51
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงระนาบของผลึกตัวอย่างที่ 1.....	52
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงระนาบของผลึกตัวอย่างที่ 2.....	53
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงระนาบของผลึกตัวอย่างที่ 3.....	54
รูปที่ 4.6	เครื่อง Scanning Electron Microscope.....	55
รูปที่ 4.7	ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 1.....	56
รูปที่ 4.8	ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 2.....	56
รูปที่ 4.9	ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 3.....	57
รูปที่ 4.10	ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 4.....	57
รูปที่ 4.11	ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 5.....	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงสมบัติเฉพาะของแลททิซ 3 มิติ 14 แบบ.....	7
ตารางที่ 2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ.....	19
ตารางที่ 2.3	แสดงกฎการสะท้อนของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับ โครงสร้างโลหะปกติ.....	20
ตารางที่ 2.4	แสดงระนาบ {hkl} ของการเลี้ยวเบนในผลึกคิวบิก.....	21
ตารางที่ 2.5	ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบเลี้ยวเบนสำหรับแลททิซแบบ bcc และ fcc.....	22
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขของแผ่นฟิล์ม.....	48
ตารางที่ 4.2	ความหนาของฟิล์ม.....	50

บทที่ 1

บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำได้มีมานานแล้ว นับตั้งแต่ได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยสารกึ่งตัวนำทั้งในด้านการทดลองและทฤษฎีควบคู่กันไป ซึ่งสามารถนำสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์ขึ้นเป็นอุปกรณ์ เพื่อใช้ในทางด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่เป็นพื้นฐานและถูกนำมาใช้กันมากคือ ซิลิคอน (Si) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการพัฒนามานาน จึงเป็นที่เข้าใจเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกันดี และมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม

อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่คาดว่าจะมีสมบัติที่ดีกว่าซิลิคอนก็ยังคงมีการดำเนินการต่อไปอย่างไม่หยุดยั้ง สารกึ่งตัวนำที่ประสบความสำเร็จมาบ้างแล้วได้แก่ GaAs, CdS และ InSb เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เหมาะสำหรับการนำไปประดิษฐ์อุปกรณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Devices) ในรูปแบบต่างๆได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการเตรียมสารกึ่งตัวนำ และการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำจึงถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการวิจัยสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ๆ เพื่อพิจารณาว่าสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นมานั้นมีสมบัติทางฟิสิกส์อย่างไร เหมาะที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการหรือไม่

แม้ว่าในปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆจะทำจากซิลิคอน แต่ก็มีการพัฒนาสารกึ่งตัวนำอื่นๆขึ้นมาอีกด้วยเช่นกัน สารกึ่งตัวนำกลุ่มหนึ่งซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์ได้ก็คือ สารกึ่งตัวนำในกลุ่มซัลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พวกคือ พวกที่มีสูตรเคมี I-III-VI₂ และ II-IV-V₂ ตามลำดับ แต่สำหรับ CuInSe₂ ที่ทำการศึกษานั้นจัดอยู่ในกลุ่มสูตรเคมี I-II-VI₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CuInSe_2 ที่ใช้วิจัยครั้งนี้ได้จากการเตรียมสารแบบฟิล์มบาง โดยการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดจุดเดียว ด้วยอัตราส่วน $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se}$ คือ 1:2:2 ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนในการวิจัยครั้งนี้มีดังนี้

1. นำธาตุ Cu , In และ Se ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีสัดส่วนของธาตุตามต้องการมาทำการหลอมที่ละลาย เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 โดยวิธีการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดจุดเดียว

2. นำแผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 มาทำการแอนนัลภายในความดันบรรยากาศ 10^{-4} ทอรัร์ ที่อุณหภูมิ 120 c

3. ศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ของ CuInSe_2 โดยการวิเคราะห์ผลสารประกอบ และวิเคราะห์สเปคตรัมด้วยวิธี X-ray Diffraction และวิเคราะห์ขนาดเกรน (grain size) แผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM)

4. นำข้อมูลที่ได้ศึกษาได้ทั้งหมดมาสรุป เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการเตรียมสาร และในการวิจัยประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ต่างๆต่อไปในอนาคต สิ่งสำคัญในงานวิจัยประการหนึ่งคือ ความต้องการที่จะเตรียมแผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 ให้มีขนาดที่พอเหมาะที่จะใช้ในการทดลองและต้องเป็นแผ่นฟิล์มบางที่มีความสมบูรณ์สูง อีกทั้งข้อบกพร่องของผลึก (crystal defect) ต้องมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งข้อบกพร่องของผลึกต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำให้ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมสาร และข้อผิดพลาดเบื้องต้นของสารที่เตรียมได้ ซึ่งนับว่าเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ทั้งเชิงวิชาการและการประยุกต์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

2.1 สารกึ่งตัวนำ

เราสามารถแบ่งประเภทของสารต่างๆ ออกเป็น 3 ประเภทตามความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิห้องสารโดยทั่วไปจะมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) อยู่ในช่วง $10^{-10} - 10^{12} \Omega\text{-cm}$ จากสมบัติดังกล่าวสามารถที่จะจำแนกประเภทของสารได้ดังนี้ คือ โลหะซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี สารกึ่งตัวนำและฉนวนซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เลว โดยเฉพาะสารกึ่งตัวนำมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^{-3} - 10^6 \Omega\text{-cm}$ และมีคุณสมบัติต่างจากสารประเภทอื่น คือ

1. มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามอุณหภูมิเป็นลบ
2. มีสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสตรง
3. สามารถตอบสนองต่อแสง กล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น และความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้
4. ให้กำลังทางไฟฟ้าเนื่องจากมีความร้อนสูง
5. สามารถโคปได้ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป

2.1.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายเพชร สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้มีโครงสร้างผลึกที่คล้ายกัน เกิดจากการจับกันของอะตอมซึ่งเป็นพันธะ 4 หน้า (Tetrahedral bond) ผลึกสารกึ่งตัวนำอาจจะประกอบไปด้วยธาตุเดี่ยวหรือเป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุหลายชนิดก็ได้ อาจแยกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำของธาตุเดี่ยว

ธาตุสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ คือธาตุในกลุ่ม IV ของตารางธาตุ โดยเฉพาะ Si และ Ge ให้นำไปทำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกันอย่างแพร่หลายสำหรับเพชรซึ่งเป็นอันธรูปของธาตุคาร์บอน ในกลุ่มเดียวกันนี้ถูกจัดให้เป็นฉนวนเนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ากว้างมากถึง 5.0 eV

2.1.1.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่ (binary compounds)

ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ที่สำคัญแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.1.1.2.1 กลุ่ม II-VI เป็นสารประกอบสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการรวมกันของธาตุกลุ่ม II ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว กับธาตุในกลุ่ม VI ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ตัว ได้แก่ ZnS, ZnSe, CdSe, ZnTe, CdTe

2.1.1.2.2 กลุ่ม III-V เป็นสารประกอบสารกึ่งตัวนำ ที่ได้จากการรวมกันของธาตุกลุ่ม III กับกลุ่ม V ได้แก่ AlP, AlAs, GaP, GaAs, InP, InAs, InSb

2.1.1.3 ผลึกสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงสาม (ternary compounds)

2.1.1.3.1 กลุ่ม I-III-VI₂ ได้จากการนำสารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI มาขยายเป็น 2 เท่า แล้วแทนที่ธาตุทั้งสองของกลุ่มอะตอมด้วยธาตุกลุ่ม I 1 อะตอม และธาตุกลุ่ม III 1 อะตอม สารในกลุ่มนี้ประกอบขึ้นจากธาตุกลุ่ม I คือ Cu, Ag กลุ่ม III Al, Ga, In และธาตุกลุ่ม VI S, Se, Te เป็นต้น

2.1.1.3.2 กลุ่ม II-IV-V₂ ได้จากการนำ สารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V มาขยายเป็น 2 เท่า แล้วจึงแทนที่ธาตุกลุ่ม III ทั้ง 2 อะตอมด้วยธาตุกลุ่ม II 1 อะตอม และธาตุกลุ่ม IV 1 อะตอม สารประกอบกลุ่มนี้ประกอบขึ้นจากธาตุกลุ่ม II คือ Be, Mg, Zn กลุ่ม IV Si, Ge Sn กลุ่ม V P, As, Sb เป็นต้น

2.1.1.4 โลหะผสมสารกึ่งตัวนำ

ผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดที่เป็นธาตุ และสารประกอบสามารถเตรียมขึ้นโดยนำเอาธาตุในกลุ่มเดียวกัน 2 ธาตุมาแทนที่กัน ในลักษณะของโลหะผสม โดยมีสัดส่วนของอะตอมต่างๆกัน ทำให้ได้ชนิดของสารกึ่งตัวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

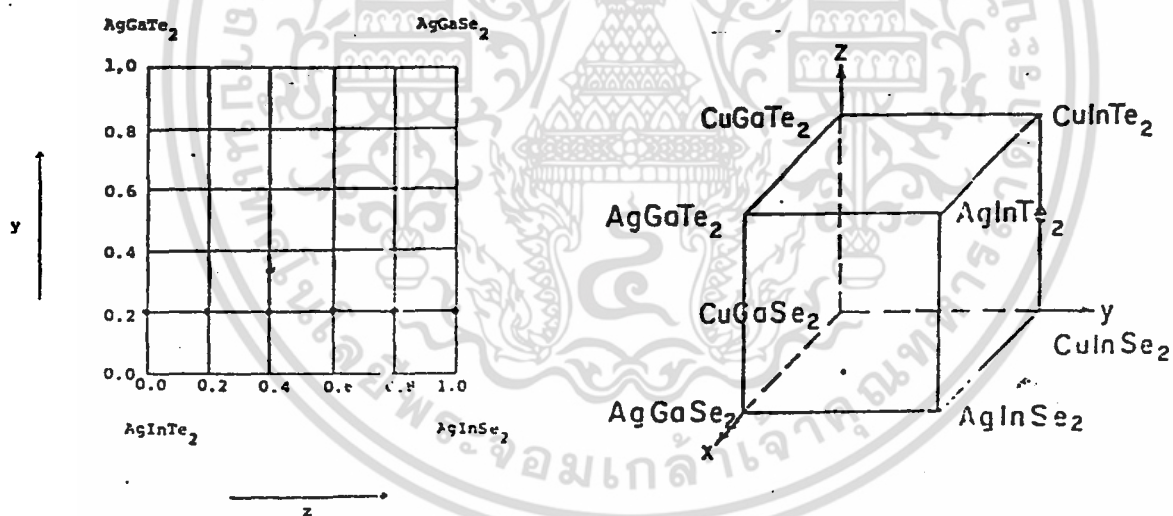
ในลักษณะนี้จำนวนไม่จำกัด แต่ละชนิดจะมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกัน บางชนิดก็ได้รับการพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างโลหะผสมสารกึ่งตัวนำที่จำแนกตามชนิดของสารเริ่มต้นได้ดังนี้

1. ชนิดเป็นธาตุ ได้แก่ $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$

2. ชนิดเป็นสารประกอบเชิงคู่ ได้แก่ $\text{Ga}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{As}$
 $\text{In}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{P}$, $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$, $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ และ $\text{CdS}_{(1-x)}\text{Te}_x$
 เป็นต้น

3. ชนิดเป็นสารประกอบเชิงสาม ได้แก่

$\text{AgIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Te}_2$, $\text{AgIn}_{(1-y)}\text{Ga}_y\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$ และ
 $(\text{Cu}_{(1-x)}\text{Ag}_x)(\text{Ga}_{(1-y)}\text{In}_y)(\text{Se}_{(1-z)}\text{Te}_z)_2$ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบสำหรับสาร

ก. $\text{AgIn}_{(1-y)}\text{Ga}_y\text{Te}_{2(1-z)}\text{Se}_{2z}$

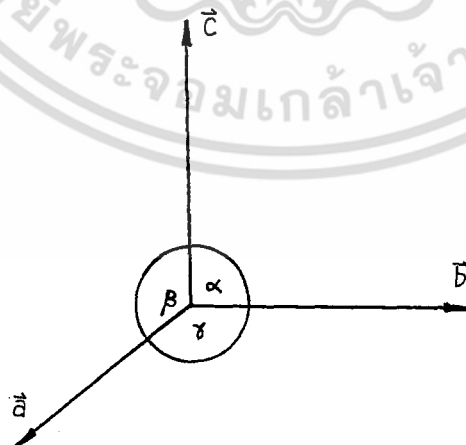
ข. $(\text{Cu}_{(1-x)}\text{Ag}_x)(\text{Ga}_{(1-y)}\text{In}_y)(\text{Se}_{(1-z)}\text{Te}_z)_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 โครงสร้างของผลึกสาร

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระบบต่อเนื่องไป ภายในหนึ่งหน่วยของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมบางธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆอะตอมหรือหลายๆโมเลกุล กลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลที่เล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมาและเรียกบริเวณช่องว่างที่มีขนาดเท่ากับหน่วยเซลล์นี้ว่า แลตทิซ (lattice)

ได้มีการจัดแบ่งรูปแบบแลตทิซขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบ ซึ่งจัดเป็นกลุ่มได้ 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออโธโรมบิก (orthorombic) และเฮกซะโกนอล (hexagonal) โดยการแบ่งชนิดของแลตทิซนี้ใช้เวกเตอร์แกนผลึก (crystal axis vector) a, b และ c กับมุม α, β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์แกนผลึกเป็นตัวกำหนดลักษณะของแลตทิซแต่ละชนิด เวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างทิศของเวกเตอร์แกนผลึกมีลักษณะดังรูป 2.2 ลักษณะของแลตทิซแต่ละชนิดแสดงได้ด้วยตาราง 2.1 และรูปของแลตทิซทั้ง 14 แบบ แสดงดังรูป 2.3



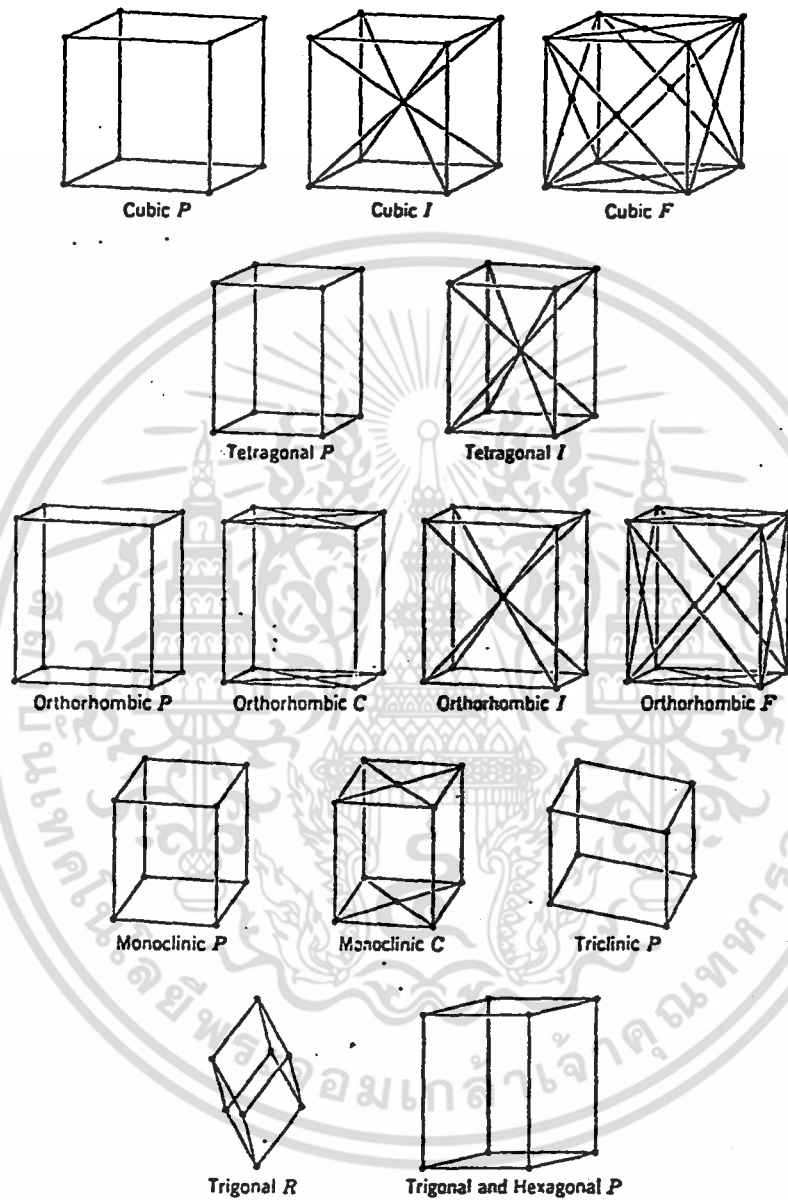
รูปที่ 2.2 แสดงเวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่าง
เวกเตอร์ทั้ง 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

System	Number of Lattice in System	Lattice Symbols	Natural of Unit-Cell Axes and Angles	Lengths and Angles to Be Specified
Triclinic	1	P	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	a, b, c α, β, γ
Monoclinic	2	P, C	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	a, b, c β
Orthorombic	4	P, C, I, F	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a, b, c
Tetragonal	2	P, I	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a, c
Cubic	3	P, I, F	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a
Trigonal	1	R	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$	a α
Hexagonal	1	P	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	a, c

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติเฉพาะของแลตทิซ 3 มิติ 14 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงรูปทรงเรขาคณิต 3 มิติของแลตทิซ 14 แบบ

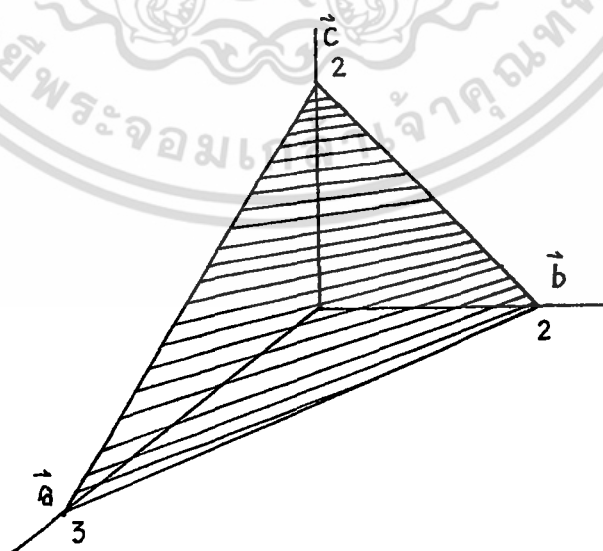
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การเรียกชื่อระนาบผลึก

การเรียกชื่อของระนาบผลึกทำได้โดยการใช้จุด 3 จุด บนระนาบที่ตัดแกนของเวกเตอร์ผลึกทั้งสาม โดยขนาดของเวกเตอร์ที่จุดระนาบตัดจะบอกไว้ในหน่วยค่าคงที่ของแลตทิซ (lattice constant) หลักการเรียกระนาบของผลึกทำได้ดังนี้คือ

1. หาจุดตัดของระนาบที่ต้องการบนแกน a, b และ c ในหน่วยของค่าคงที่แลตทิซ
2. กลับเศษเป็นส่วนของตัวเลขข้อ 1 แล้วทำให้เป็นจำนวนเต็มบวกหรือลบหรือศูนย์ ที่มีค่าน้อยที่สุดด้วยอัตราส่วนเดียวกัน แล้วเขียนชื่อระนาบในวงเล็บด้วยสัญลักษณ์ที่เรียกว่า ดัชนี มิลเลอร์ (Miller indices) คือ h, k และ l เป็นตัวเลขที่หาได้จากข้อ 2 นี้
3. ในกรณีที่จุดตัดแกนมีค่าเป็นลบ ให้เขียนเครื่องหมายลบไว้ข้างหน้าตัวเลขบนแกนนั้นด้วย เช่น $(\bar{1}00)$, $(\bar{1}11)$ เป็นต้น

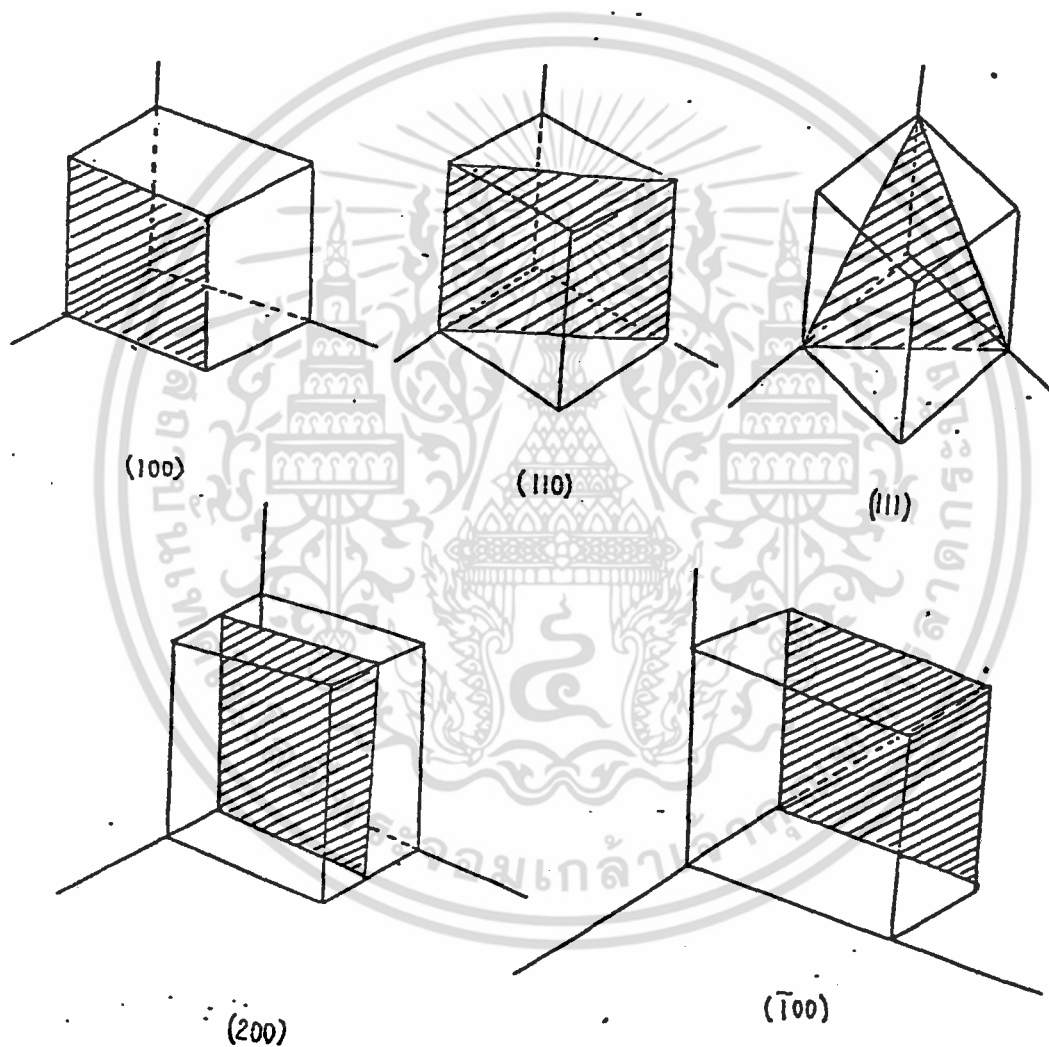
ตัวอย่างการหาจุดตัดแกนแสดงได้ด้วยรูป 2.4 และตัวอย่างบางระนาบของผลึกแสดงได้ด้วยรูป 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงจุดตัดของระนาบบนแกนทั้งสามของระนาบ (233)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 จุดตัดแกนทั้งสามคือ $3a, 2b, 2c$ กลับเศษเป็นส่วน
ของจำนวนทั้งสามคือ $1/3, 1/2, 1/2$ ทำให้เป็นจำนวนเต็มน้อยที่สุดในอัตราส่วน
เดียวกันได้เป็น $2, 3, 3$ ดังนั้นชื่อระนาบนี้เขียนได้เป็น (233)

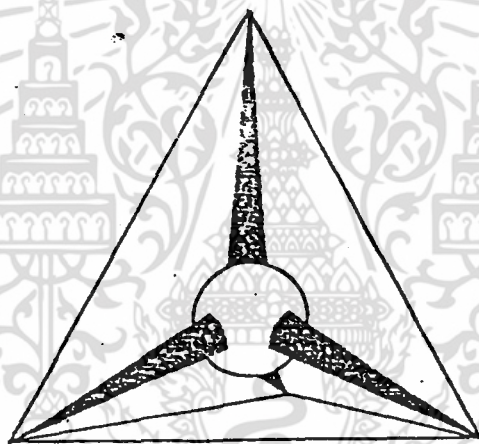


รูปที่ 2.5 แสดงระนาบที่สำคัญบางระนาบของผลึกคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 . โครงสร้างของผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับ ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆที่เราเรียกว่าโครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้มีลักษณะคล้ายกันคือ มีการเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายกับโครงสร้างผลึกของเพชร เกิดจากการจับกันของธาตุที่มีพันธะ 4 หน้า ดังรูป



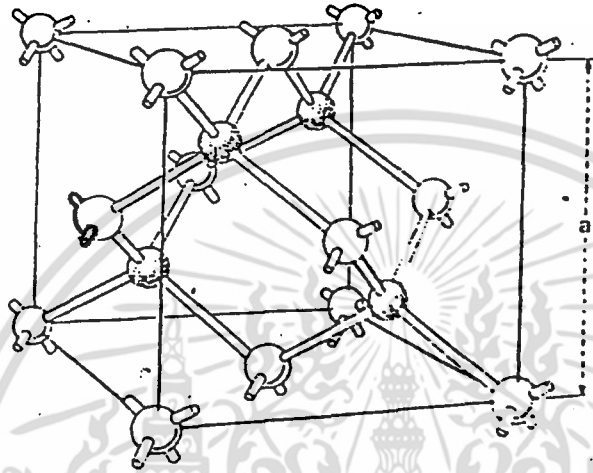
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างลักษณะพันธะ 4 หน้า

2.1.4.1 โครงสร้างแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ C Si, Ge และ α -Sn อาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างนี้เกิดจาก การนำเอาโครงผลึกแบบ fcc (face-centered cubic lattice , $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$) 2 โครงผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $1/4$ ของเส้นทะแยงมุมโดย 1 หน่วยเซลล์มี 8 อะตอม และอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันอยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ 0, 0\ 1/2\ 1/2, 1/2\ 0\ 1/2, 1/2\ 1/2\ 0, 1/4\ 1/4\ 1/4, 1/4\ 3/4\ 3/4, 3/4\ 1/4\ 3/4, 3/4\ 3/4\ 1/4$ แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปลูกบาศก์ซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุดในจำนวนโครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

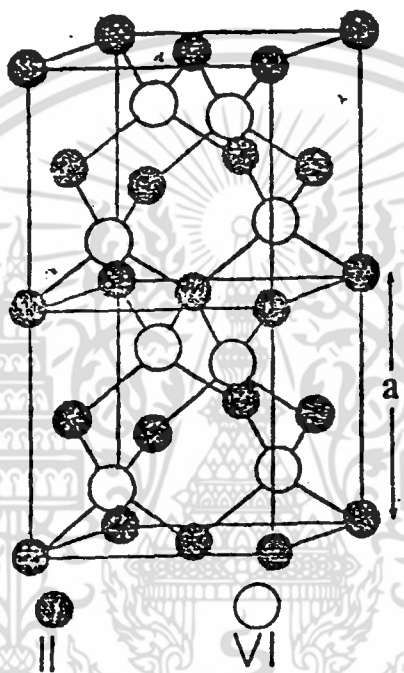
2.1.4.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe และ ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแบบเพชร คืออาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic 2 โครงสร้างซ้อนกันอยู่ แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-IV (หรือ III-V) ใน 1 หน่วยเซลล์ประกอบไปด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs

อะตอมของ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง $0\ 0\ 0, 0\ 1/2\ 1/2, 1/2\ 0\ 1/2, 1/2\ 1/2\ 0$

อะตอมของ As อยู่ที่ตำแหน่ง $1/4 \ 1/4 \ 1/4, 1/4 \ 3/4 \ 3/4, 3/4 \ 1/4 \ 3/4$
 $3/4 \ 3/4 \ 1/4$

ในกรณีของ GaAs ที่ปลายแขนของ Ga จะมี As จับอยู่ 4 อะตอม และปลายแขน As จะมี Ga จับอยู่ 4 อะตอมเช่นเดียวกัน ดังนั้น โครงสร้างแบบนี้ยังคงเป็นรูปลูกบาศก์อยู่แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างแบบเพชร



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างแบบ ซิงค์เบลนด์

2.1.4.3 โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้พบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วย ธาตุ 3 ชนิด ที่เรียกว่าสารประกอบสารกึ่งตัวนำเชิงสาม ซึ่งได้แก่สารในกลุ่ม I-III-VI₂ เช่น AgGaTe₂ และ CuInSe₂ เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (ชนิดกลุ่ม II-VI และ III-V ตามลำดับ) เราอาจพิจารณาว่าเป็นการเพิ่มองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ในกลุ่ม II-VI เป็น 2 เท่า แล้วแทนที่ธาตุหมู่ II ด้วยธาตุหมู่ I และ III ตามลำดับ ตามรูปที่ 2.9 โดยการขยายหน่วยเซลล์ของซิงค์เบลนด์ออกเป็น 2 เท่าตามแกน c 1 หน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์จึงเป็น 2 เท่าของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



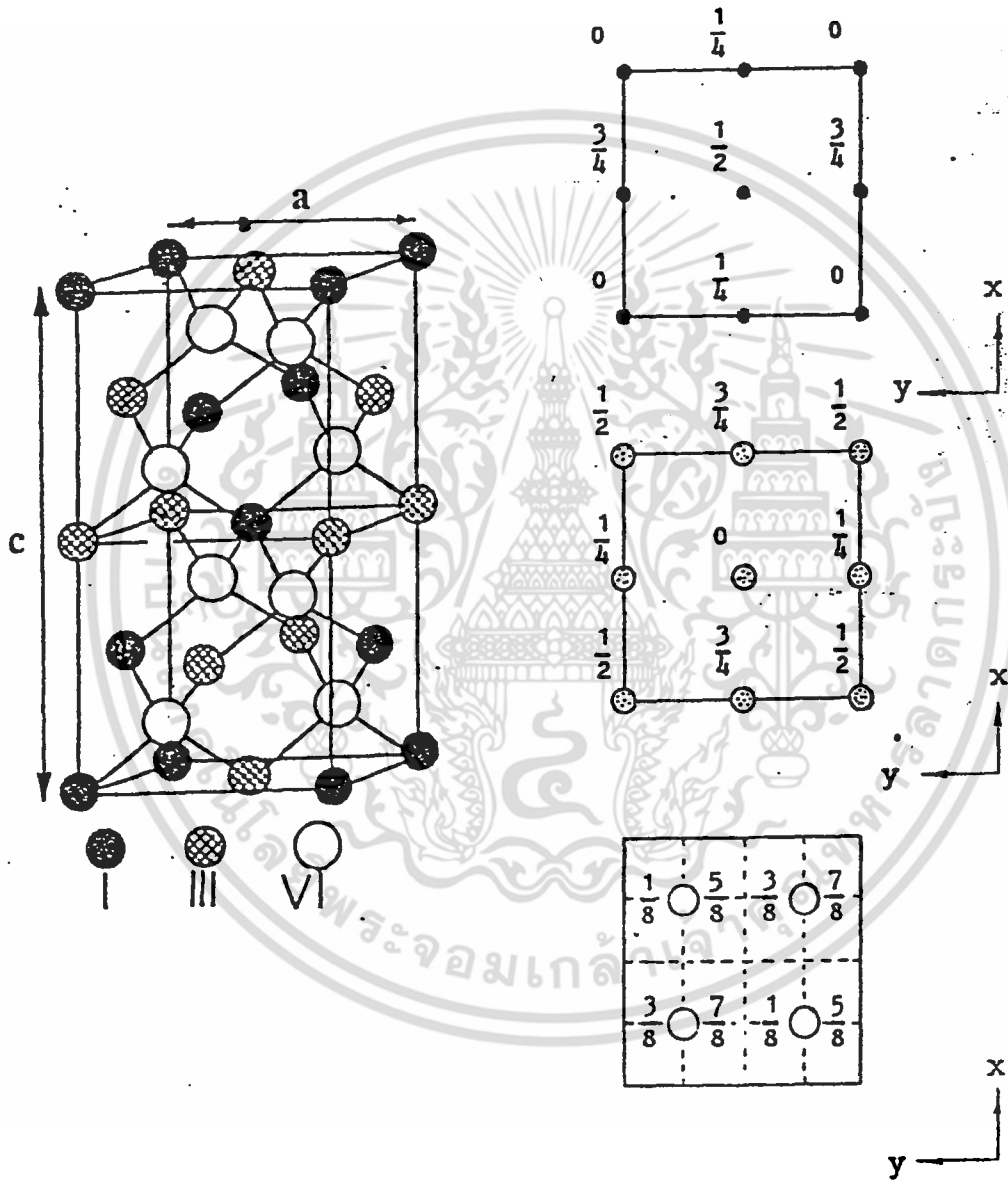
ซิงค์เบลนด์และมี 16 อะตอม ตัวอย่างเช่น สารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI₂ ในโครงผลึกแบบ fcc อันหนึ่งประกอบด้วย อะตอมของธาตุในกลุ่ม I และ III เรียงสลับกันตามแนวแกน c และโครงสร้างผลึกอีกอันหนึ่งมีเฉพาะอะตอมของธาตุกลุ่ม VI เรียงอยู่ใน 1 เซล จำนวนและตำแหน่งอะตอมของธาตุต่างๆมีดังนี้คือ

ธาตุกลุ่ม I มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	0 0 0, 0 1/2 3/4, 1/2 1/2 1/2 1/2 0 1/4
ธาตุกลุ่ม III มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	0 0 1/2, 0 1/2 1/4, 1/2 1/2 0 1/2 0 3/4
ธาตุกลุ่ม VI มี 8 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	x 1/4 3/8, x 1/4 7/8, 3/4 x 1/8 1/4 x 1/8, x 3/4 3/8, x 3/4 7/8 1/4 x 5/8, 3/4 x 5/8

โดยที่ $x = 1/4 + U$ และ $x = 3/4 + U$ และ U คือ การเลื่อนของแอนไอออน (anion displacement) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อะตอมของธาตุกลุ่ม VI จับกับอะตอมของธาตุกลุ่ม I และกลุ่ม III อย่างละ 2 อะตอม จึงทำให้ความยาวของพันธะ (bond length) ไม่เท่ากัน

ตามหลักการดังกล่าวความยาวของแกน c ควรเป็น 2 เท่าของความยาวของแกน a หรือ $c/a=2$ แต่ในความเป็นจริงเนื่องจากโครงสร้างผลึกนี้ประกอบด้วยอะตอมของสารที่แตกต่างกันถึง 3 ชนิด ทำให้มีพันธะอยู่ 2 ชนิดซึ่งมีขนาดของพันธะไม่เท่ากัน ได้แก่ ชนิด I-IV และชนิด III-VI ในการจับตัวแบบพันธะ 4 หน้า เป็นผลให้อะตอมชนิด VI เลื่อนไปจากตำแหน่ง (1/4, 1/4, 1/4) ในโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ ไปที่ตำแหน่ง (U, 1/4, 1/8) ของโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ โดยที่ U อาจมากหรือน้อยกว่า 1/4 ขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ เรียกว่า พารามิเตอร์ U (U-parameter) นอกจากนี้แรงดึงดูดระหว่างอะตอมในทิศทางตั้งฉากกับแกน c และขนานกับแกน c ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการหดหรือขยายตัวของผลึกในแกน c ทำให้ค่า c/a ไม่เท่ากับ 2 เรียกว่า การบิดเบี้ยวของเตตระโกนอล (tetragonal distortion) ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการแยกออก (split) ของระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์
ในโครงสร้างชนิดนี้



รูปที่ 2.9 (ก) แสดงโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์

(ข) แสดงตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม CuInSe₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

2.2.1 การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในการศึกษาสารกึ่งตัวนำนั้น เริ่มต้นจากการเตรียมผลึกจะด้วยวิธีใดก็ตาม เมื่อได้ผลึกสารตัวอย่างขึ้นมาแล้วก่อนที่จะมีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ใดๆต่อไป จะต้องผ่านขั้นตอนที่สำคัญที่สุด คือการตรวจสอบหรือศึกษาโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ โดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) เพื่อเป็นการยืนยันว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของผลึก ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ ในศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นอีกทั้งยังเป็นแนวทางในการนำทฤษฎีดังกล่าวไปประยุกต์ เพื่อหาค่าคงที่ของโครงผลึกของสารที่มีโครงสร้างแบบอื่นต่อไป

2.2.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึก

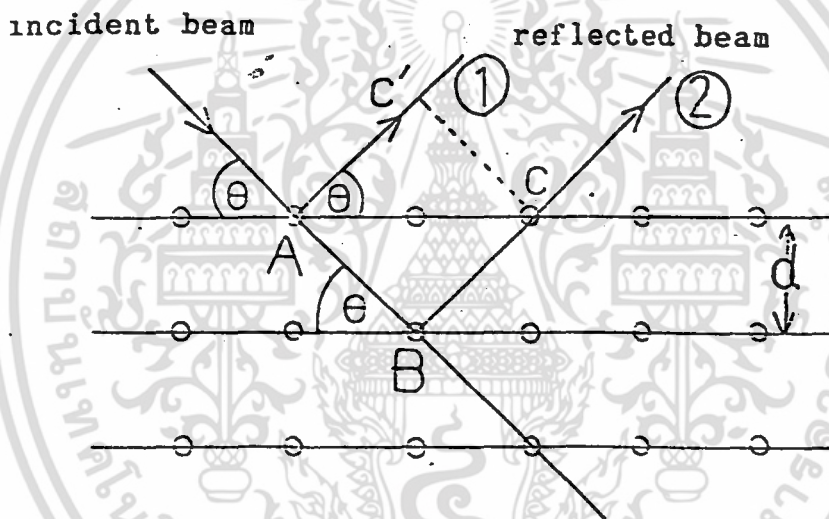
การเลี้ยวเบนเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก โดยความยาวคลื่นที่ใช้ศึกษาการเลี้ยวเบนจากผลึกนั้นจะต้องมีค่าพอๆกับระยะห่างของอะตอมภายในผลึก คือประมาณ 1 \AA คลื่นที่ใช้ในการศึกษาการเลี้ยวเบนมีอยู่ 3 ชนิด คือ รังสีเอ็กซ์ รังสีแคโทดหรืออิเล็กตรอน และนิวตรอน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น

ในปี พ.ศ. 2438 Roentgen เป็นผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านตัวกลางต่างๆได้ดี ช่วงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เหมาะสมสำหรับหาโครงผลึกควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 \AA ถึง 3 \AA เมื่อรังสีตกกระทบผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนเพราะอิเล็กตรอนของอะตอมในผลึกสั่นเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และให้พลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่ค่าเดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหรือ กล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนในอะตอม จะทำหน้าที่เสมือนเป็นต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์ความถี่เดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านเข้ามาในอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.1.1 กฎของแบรกก์ (Bragg Law)

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนอะตอม ซึ่งจัดเรียงตัวกัน อยู่บนระนาบของโครงผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น เมื่อมุมตกกระทบบ ความยาวคลื่น และ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกมีค่าที่เหมาะสม อะตอม เหล่านี้จะกระเจิงรังสีเอ็กซ์ทำให้ดูเหมือนกับว่า รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบ แล้วเกิดการสะท้อน โดยที่ระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d ให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบที่จุด A และ B เป็นมุม θ แล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ เท่า เดิม มุม θ นี้เรียกว่ามุมของแบรกก์ (Bragg angle) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึก ตามเงื่อนไขของแบรกก์

พิจารณารูปที่ 2.10 จะเห็นว่าคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อทางเดินของคลื่นทั้งสองมีค่าต่างกันเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ให้ Δ เป็นทางเดินที่ต่างกันของคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า

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

จากรูป

$$\Delta = AB + BC - AC$$

$$= 2AB - AC$$

เมื่อ $AB = d/\sin \theta$ ----- (2)

และ $AC = AC \cos \theta$

$$AC = (2d/\tan \theta) \cos \theta$$
 ----- (3)

แทนค่าสมการ (2) และ (3) ลงใน (1) จะได้

$$2d \sin \theta = n\lambda$$
 ----- (4)

สมการ (4) นี้เรียกว่า กฎของแบรกก์ (The Bragg Law) เป็นสมการที่สามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ผ่านฟิล์มบางได้

2.2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก

จากความรู้ทางผลึกวิทยา (Crystallography) ซึ่งพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยระนาบชุดต่างๆ เราเขียนสัญลักษณ์แทนระนาบชุดดังกล่าวได้ด้วยรูปแบบดังนี้ คือ (h k l) ซึ่ง h, k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0, 1, 2, ... ซึ่งเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ (h, k, l) และค่าคงที่ของโครงผลึก (a, b, c, α , β , γ) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกของระบบผลึก (crystal systems) แบบต่างๆ ปรากฏดังตารางที่ 2.1

สำหรับผลึกที่จัดอยู่ในระบบเตตระโกนอล (Tetragonal system $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$) พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้คือ

$$1/d_{hkl}^2 = ((h^2 + k^2)/a^2) + (l^2/c^2)$$
 --- (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเรารวมสมการที่ (4) เมื่อ $n = 1$ กับสมการที่ (5) แล้ว ก็จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (h, k, l) ดังสมการ

$$4\sin^2 \theta / \lambda^2 = ((h^2 + k^2)/a^2) + (l^2/c^2) \quad \text{---- (6)}$$

Cubic:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$$

Tetragonal:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

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

Rhombohedral:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}{a^2(1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha)}$$

Orthorhombic:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

Monoclinic:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)$$

Triclinic:
$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl)$$

In the equation for triclinic crystals

$$\begin{aligned} V &= \text{volume of unit cell (see below),} \\ S_{11} &= b^2c^2 \sin^2 \alpha, \\ S_{22} &= a^2c^2 \sin^2 \beta, \\ S_{33} &= a^2b^2 \sin^2 \gamma, \\ S_{12} &= abc^2(\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma), \\ S_{23} &= a^2bc(\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha), \\ S_{13} &= ab^2c(\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta). \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crystal Structure	Diffraction Does Not Occur When:	Diffraction Occurs When:
Body-centered cubic (bcc)	$h + k + l = \text{odd number}$	$h + k + l = \text{even number}$
Face-centered cubic (fcc)	h, k, l mixed (i.e., both even and odd numbers)	h, k, l unmixed (i.e., are all even numbers or all odd numbers)
Hexagonal close packed (hcp)	$(h + 2k) = 3n, l$ odd (n is an integer)	All other cases

ตารางที่ 2.3 แสดงกฎการสะท้อนของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับโครงสร้างโลหะปกติ

2.2.2 สภาวะการเลี้ยวเบนสำหรับเซลล์ 1 หน่วยที่เป็นรูปลูกบาศก์

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดหา โครงสร้างของ พหุผลึกของแข็ง การแปลความหมายของข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ส่วนใหญ่ มีความซับซ้อน การวิเคราะห์ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับเซลล์ 1 หน่วย รูปลูกบาศก์ สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$d_{hkl} = a / \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

กับสมการแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = 2a \sin \theta / \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \text{ ----- (7)}$$

สมการนี้สามารถใช้กับข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในกรณีที่โครงสร้างผลึกลูกบาศก์เป็น body-centered หรือ face-centered cubic โดยใช้สมการ (7) สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบน ซึ่งเราทราบระนาบผลึกที่เป็นระนาบเลี้ยวเบนสำหรับแต่ละแบบของโครงสร้างผลึกสำหรับ simple cubic lattice การสะท้อนจากทุกระนาบ (hkl) เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้าง bcc การเลี้ยวเบนเกิดเฉพาะระนาบซึ่งเป็น Miller indices เมื่อเพิ่มผลรวม (h+k+l) เข้าด้วยกันกับจำนวนคู่ (ตารางที่ 2.4) ดังนั้นสำหรับโครงสร้างผลึกแบบ bcc ระนาบการเลี้ยวเบนพื้นฐานเป็น {110}, {200}, {211} เป็นต้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.5 ในกรณีโครงสร้างผลึก fcc ระนาบการเลี้ยวเบนพื้นฐานของ Miller indices เป็นทั้งกรณีคี่และคู่ (0 พิจารณาเป็นคู่) ดังนั้นสำหรับโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบเลี้ยวเบนเป็น {111}, {200}, {220} เป็นต้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.5

Bravais lattice	Reflections present	Reflections absent
BCC	(h + k + l) = even	(h + k + l) = odd
FCC	(h, k, l) all odd or all even	(h, k, l) not all odd or all even

ตารางที่ 2.4 แสดงระนาบ {hkl} ของการเลี้ยวเบนในผลึกคิวบิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

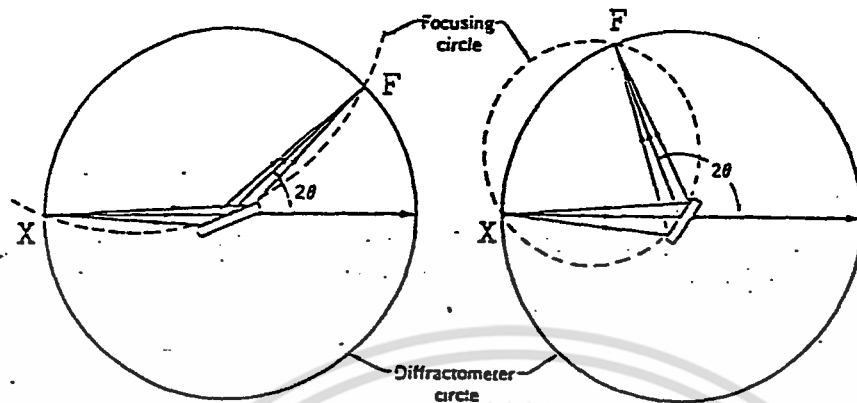
$h^2 + k^2 + l^2$	{hkl}	
	FCC	BCC
1	...	110
2	111	
3	200	200
4	...	211
5
6	220	220
7
8	...	310
9
10

ตารางที่ 2.5 ดัชนี मिलเลอร์ของระนาบเลี้ยวเบนสำหรับแลตทิซแบบ bcc และ fcc

2.2.3 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยผลึกผงในเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์

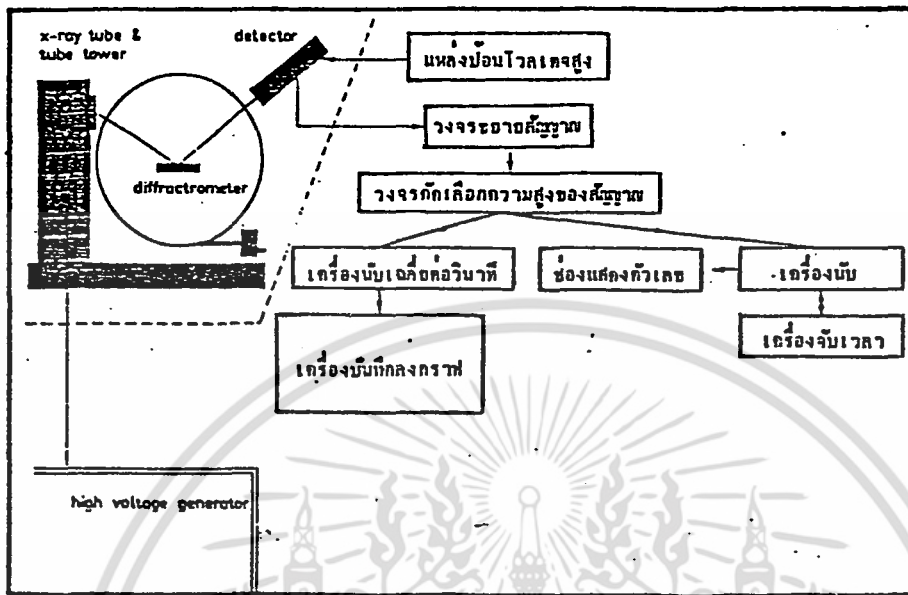
เครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ถูกออกแบบโดยอาศัยหลักการทำงานที่ทำให้ผลึกผงสารตัวอย่างวางอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (Diffractometer circle) รังสีเอ็กซ์จากจุดกำเนิด (point source) X ซึ่งมีแนวลู่ออก (diverge) ตกกระทบผลึกผงสารตัวอย่าง โดยทำมุมตกกระทบกับระนาบของผลึกผงสารตัวอย่างเป็นมุม θ ทำให้รังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนไปในแนวทำมุม 2θ กับแนวของรังสีตกกระทบและไปรวมกันที่จุดๆหนึ่งซึ่งเรียกว่า " จุดโฟกัส " (focus) F โดยที่ X และ F อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ทั้งนี้จุดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ผลึกผงสารตัวอย่างและจุดโฟกัสจะต้องอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโฟกัส (focusing circle) ด้วย ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์

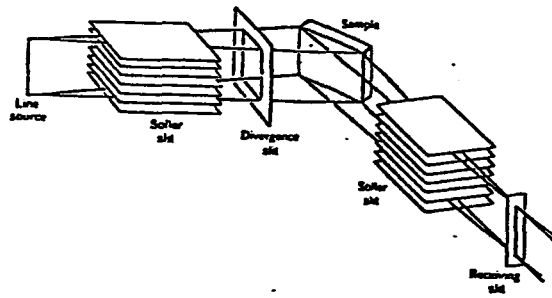
มีข้อที่นำสังเกตคือ ในขณะที่ผลึกผงของสารตัวอย่างซึ่งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์หมุนไปเพื่อทำให้มุมตกกระทบ θ เปลี่ยนไปนั้น แนวของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนที่ไปรวมที่จุดโฟกัสก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย เนื่องจากสารตัวอย่างเป็นแผ่นราบดังนั้นจะทำให้จุดโฟกัสเคลื่อนเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ก็ยังคงถือว่าอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโฟกัสและจุดโฟกัสก็จะอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์ โดยมีระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสกับผลึกผงสารตัวอย่างที่จุดศูนย์กลางเป็นระยะคงที่เท่ากับรัศมีของวงกลมดิฟแฟรกโตมิเตอร์เสมอ ส่วนความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนที่จุดนั้นจะทำการวัดโดยตัวตรวจวัด (detector) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนโฟตอนของรังสีเอ็กซ์เป็นสัญญาณโวลต์เตจ ผ่านวงจรขยายสัญญาณวงจรคัดเลือกความสูงของสัญญาณแล้วเข้าเครื่องนับ (scaler) และเครื่องจับเวลา (timer) แล้วแสดงเป็นตัวเลขให้เห็น ดังบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.12



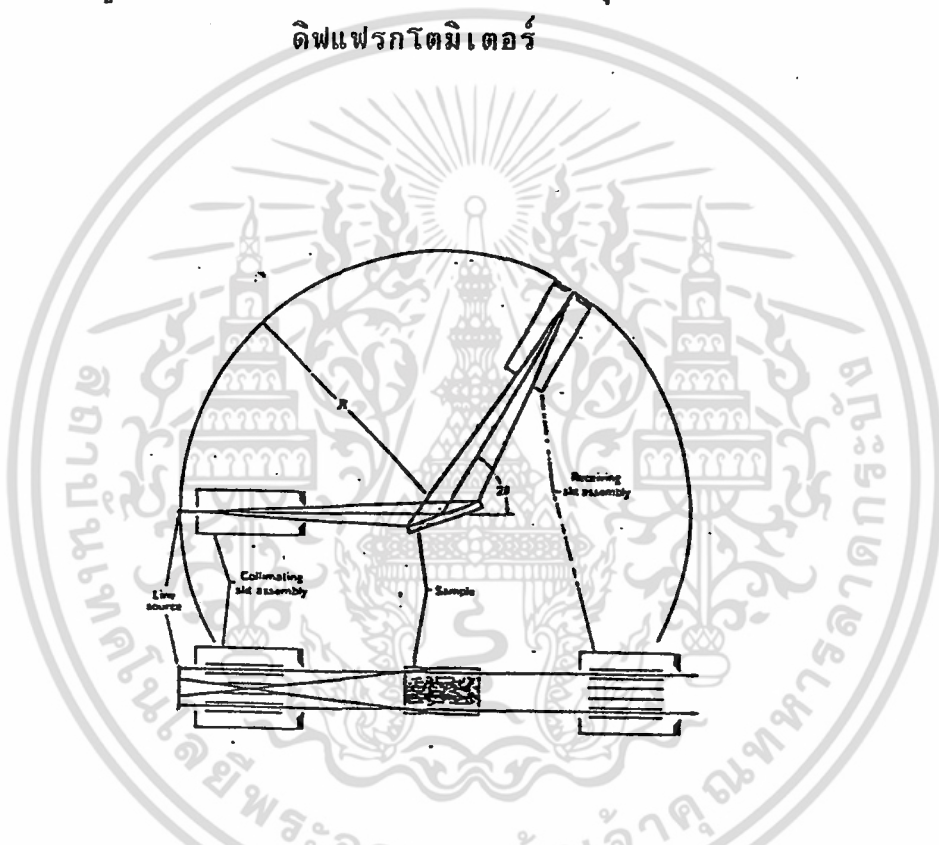
รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์

นอกจากนี้สัญญาณที่ออกจากวงจรรักษาเลือกความสูงของสัญญาณอาจจะเลือกให้ผ่านเข้าเครื่องนับเฉลี่ยต่อวินาที (rate meter) แล้วส่งไปยังเครื่องบันทึกผลกราฟ (recorder) ก็ได้ ดังนั้นหลักการทำงานของเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์จะทำงานในลักษณะที่

1. ตำแหน่งของตัวตรวจวัดจะอยู่ที่จุดโฟกัส
2. ในขณะที่ผลึกผงสารตัวอย่างซึ่งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์หมุนไปจากเดิมเป็นมุม θ ตัวตรวจวัดจะต้องหมุนไปจากตำแหน่งเดิมตามแนวเส้นรอบวงของวงกลมดิฟแฟรคโตมิเตอร์เป็นมุม 2θ อย่างสัมพันธ์กันพอดี



รูปที่ 2.13 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่อง
ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์



รูปที่ 2.14 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่อง
ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

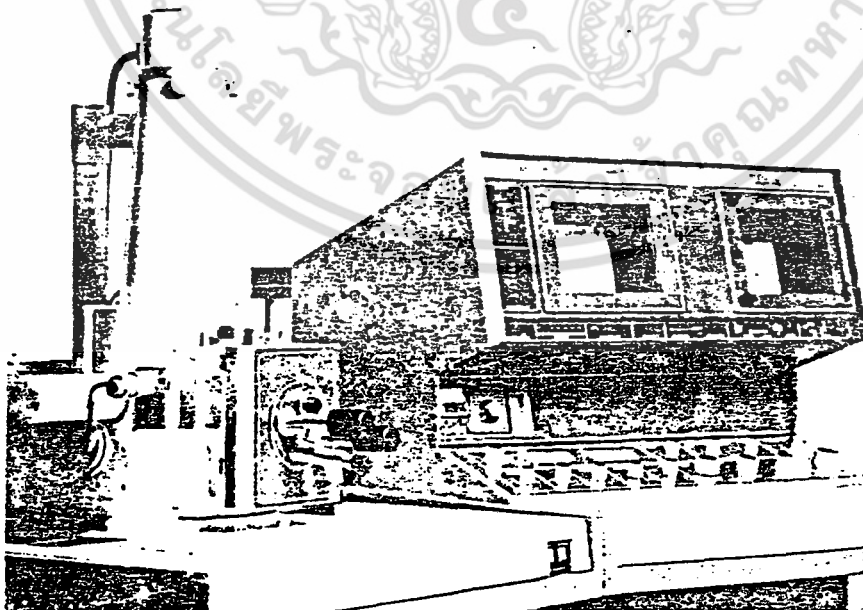
ซึ่งจากรูปทั้งสองจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเส้น (line source) ให้รังสีที่เป็นแนวลู่ออก ผ่านช่องโซลเลอร์ (soller slit) และช่องลู่ออก (divergence slit) แล้วไปตกกระทบบนผลึกผงสารตัวอย่าง รังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนจะผ่านช่องโซลเลอร์อีกชุดหนึ่งโดยมีแนวรังสีลู่เข้า (converge) แล้วผ่านเข้าช่องรับ (receiving slit) เข้าไปยังตัวตรวจวัดช่องลู่ออกทำหน้าที่ป้องกันมิให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบไปถูกส่วนอื่นๆของเครื่องนอกจากเอกส ์นั้นเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตัวอย่างเท่านั้น ทั้งช่องโฮลเลอร์และช่องลู่ออกปกติจะทำรวมอยู่ในชุดเดียวกันรวมเรียกว่า " ชุดช่องทำขนาน " (collimating slit assembly) ส่วนช่องโฮลเลอร์และช่องรับก็จะทำรวมอยู่ในชุดเดียวกันเรียกว่า "ชุดช่องตัวรับ" (receiving slit assembly) ข้อมูลที่เครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์วัดได้ จะถูกบันทึกโดยเขียนเป็นกราฟระหว่างมุม 2θ กับค่าจำนวนของสัญญาณที่เครื่องนับเฉลี่ยนับได้ในเวลา 1 วินาที ที่มุม 2θ นั้นๆ ตัวตรวจวัดจะมีขีดความสามารถในการบันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติจากค่ามุมของแบรกก์ (2θ) ในช่วงมุม 0° จนถึง 180°

2.3 ผิวหน้าของผลึก

2.3.1 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยสายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉาย หรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิว ปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์มได้ ซึ่งลักษณะของกล้องมีดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนหรือ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM

SEM โดยทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โครงสร้างง่าย ๆ ที่เห็นได้ชัดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.16 คือส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลวงเรียกว่า column และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมด เรียกว่า console unit ทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัดเพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของ SEM ไม่ว่าจะ เป็นแบบหรือรุ่นใดจะขาดอย่างหนึ่งอย่างใดเสียมิได้ เพราะ column ยังประกอบด้วยส่วนพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอน แล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ภายในช่องตัวอย่าง ซึ่งอยู่ภายในบริเวณฐานของ column อุปกรณ์ที่รับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่าง ก็ถูกจัดวางไว้เหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกัน ส่วนภายใน console unit ซึ่งเป็นแผงควบคุมระบบไฟฟ้า ระบบสุญญากาศ และระบบถ่ายภาพนั้น ประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบ เช่น การควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน column จำต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ console unit

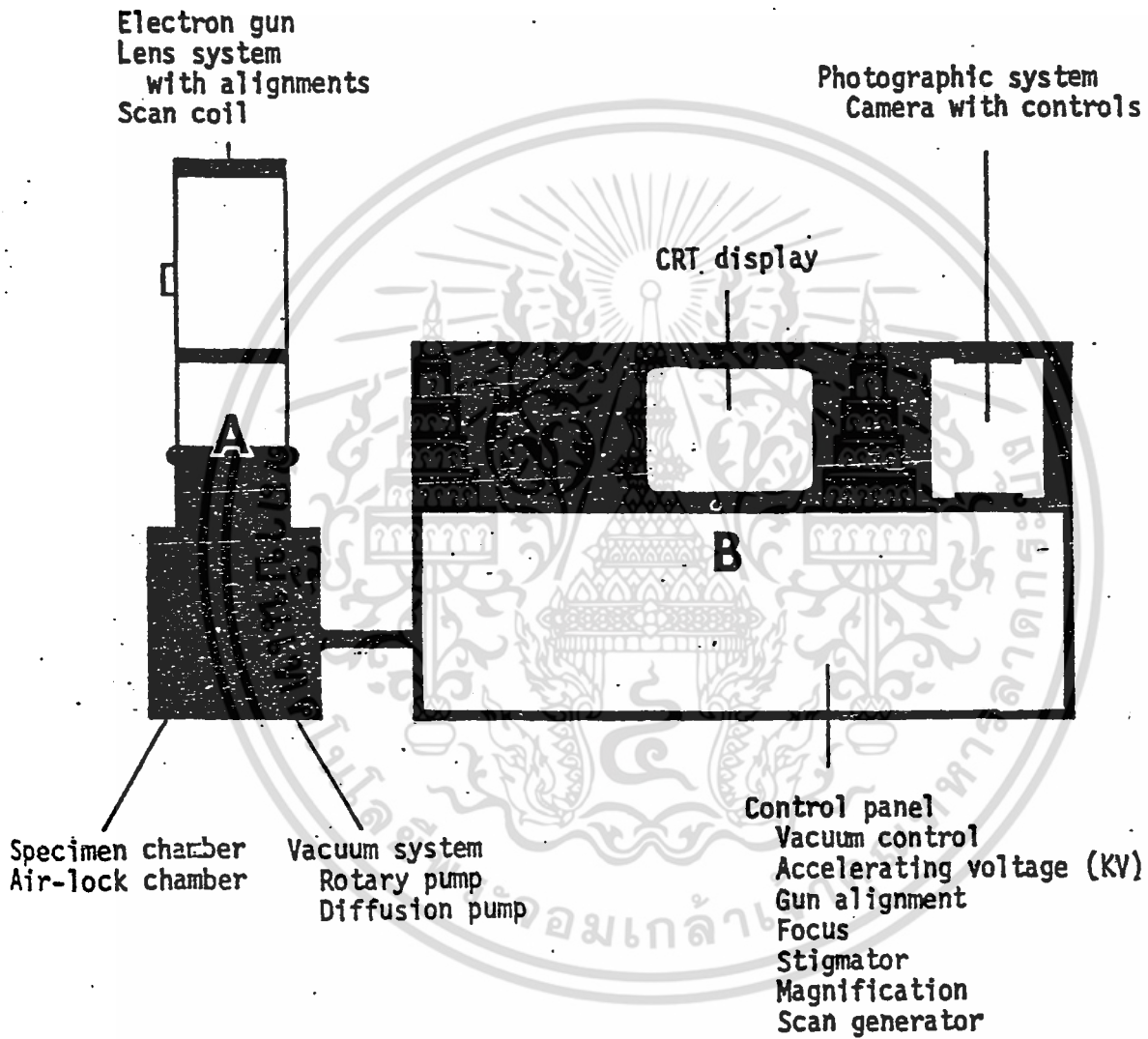
นอกเหนือจาก column และ console unit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นยิ่งสำหรับ SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็นคือระบบทำสุญญากาศ (vacuum system) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (high voltage generator) และระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (water cooling system)

ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ซึ่งควรทราบมีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun)
2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil)
3. ช่องตัวอย่าง (Specimen chamber)
4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & scintillator)
5. อุปกรณ์สร้างภาพและภาพถ่าย (Imaging photographic devices)

ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17

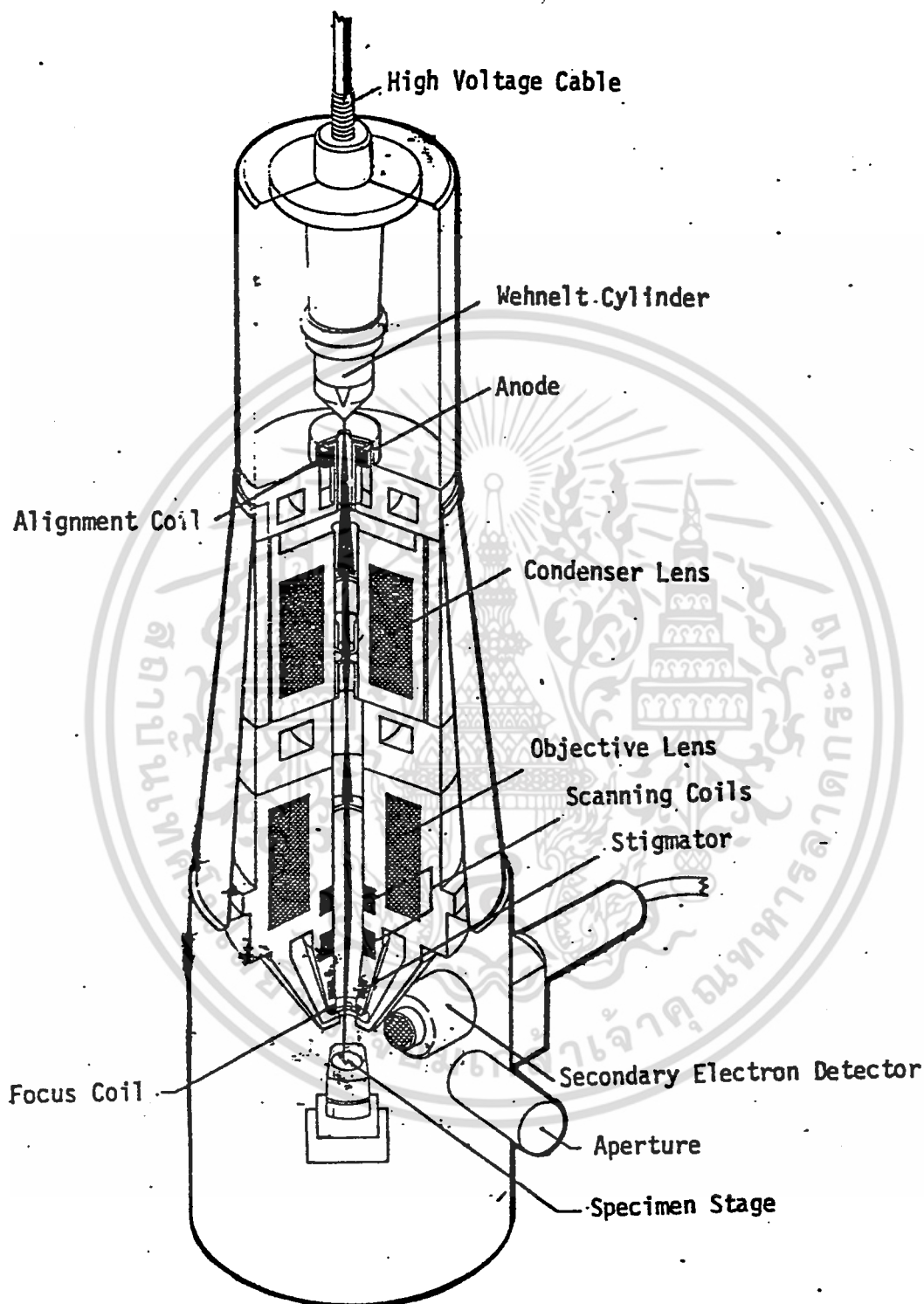
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบต่างๆรวมทั้งระบบภายใน column (A)

และ console unit (B) ของ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงให้เห็นส่วนประกอบสำคัญของ SEM

ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูง (high voltage cable) ที่ต่อจากถึงแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ ไปเป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูง 1-30 กิโลโวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยหลอดโลหะทั้งสแตนที่บิดเป็นรูปตัววี (V) เรียกว่า filament และล้อมรอบด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) มีรูอยู่ที่ปลายกรวย เมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 โวลต์จะไปเข้ามาสู่ filament หลอดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนจะกระจายออกมา ในสภาวะสุญญากาศภายใน column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนด คือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำ อิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอ สำหรับฉายลงบนตัวอย่าง

electron gun ที่มี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก electron gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ electron gun อยู่ในแนวตรงได้ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์ สนามแม่เหล็กภายใน column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ electron gun ให้ได้ศูนย์กลางแล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่นอานอด เพื่อจะช่วยปรับลำ

อิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรก ขดลวดดังกล่าวเรียกว่า alignment coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม (alignment knobs) บนแผงของ console unit

เหตุผลที่ต้องปรับ electron gun ทั้งโดยวิธีอย่างหยาบ (ปรับเลื่อน electron gun) ทั้งชุดโดยปรับหรือเลื่อนสกรูและปรับอย่างละเอียด โดยใช้ alignment knob ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก็เพื่อจะให้ลำ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิด เบี้ยว

หรือเขวออกไปจากศูนย์กลาง หากมีการบิดหรือเขวของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทาง อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไป

ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ทั้งนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยหลักการที่ว่าจำนวน secondary electron ที่เกิดขึ้นย่อมขึ้นอยู่กับจำนวนของ primary electron สรุปแล้วการปรับ electron gun (gun alignment) เป็นขั้นตอนที่สำคัญยิ่งเพื่อจะให้ได้มาซึ่งผลหรือภาพที่สมบูรณ์ที่สุด

2. เลนส์ควมคุมลำ อิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (electromagnetic lens & scan coil) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกัน ทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำ รูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำ ดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและพร้อมกันนั้นก็ใช้สนามแม่เหล็กขับ หรือผลักให้ลำ อิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส

โดยทั่วไปแล้วเลนส์ของ SEM ประกอบด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 2-3 ชุด ซึ่งวางซ้อนกันใน column เลนส์ชุดแรกอยู่ใต้แผ่นอนาโนดซึ่งอยู่ด้านล่างของ electron gun ชุดอื่นๆก็วางไว้ในแนวเดียวกัน ถัดลงมาตามลำดับ เลนส์ดังกล่าวจัดเป็นเลนส์รวมแสงอิเล็กตรอน (condensor lens) บางครั้งเลนส์ชุดสุดท้ายที่อยู่ล่างสุดเรียกชื่อเฉพาะว่า objective lens ทั้งๆที่ทำหน้าที่รวมแสงเพื่อให้ตกกระทบบนตัวอย่าง

เลนส์แต่ละชุดมี aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลือง หรือทังสเตน มีรูปร่างแตกต่างกัน ($50\ \mu\text{m}$ - $400\ \mu\text{m}$) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำ อิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำ อิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น aperture พิเศษ เรียกว่า objective aperture มีไว้เพื่อกลับกรองลำ อิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุด รวมทั้งกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบบนจุดต่างๆบนผิวตัวอย่าง เพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ

นอกจาก aperture แล้ว ระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ SEM ยังต้องการใช้อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แก้ไขความบกพร่องของเลนส์ อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนประจำเลนส์โดยเฉพาะที่ทำการเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย เรียกว่า stigmator ให้เพื่อแก้ไขการบิดเบี้ยวของเลนส์ (astigmatism) ชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นจริงแล้วก็คืออุปกรณ์ที่สร้างสนามแม่เหล็กขนาดเล็ก ซึ่งควบคุมและเปลี่ยนแปลงได้ โดยการปรับหรือเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าแรงต่ำที่เข้าไปยังอุปกรณ์นี้ ปุ่มควบคุมอยู่บนแผงของ console unit

บริเวณเลนส์ชุดสุดท้ายของ SEM มีอุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งจะขาดเสียไม่ได้คือขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำ อิเล็กตรอน ปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่าง ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าที่เรียกว่า scan generator ตัวควบคุมนี้ยังทำหน้าที่ควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอรับภาพ (CRT) ให้เคลื่อนไปในทิศทางและเวลาเดียวกับลำ อิเล็กตรอนที่ส่องกราดไปบนตัวอย่าง ปุ่มควบคุมซึ่งตามความเป็นจริงเป็นการปรับ scan generator เป็นการบังคับทั้งลำ อิเล็กตรอนและลายเส้นบนจอ CRT ให้เร็วหรือช้า ปุ่มบังคับนี้อยู่บนแผงของ console unit เช่นกัน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์ชุดสุดท้าย ช่องนี้เป็นช่องสุญญากาศกว้างพอที่จะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบ หรือรวบรวมสัญญาณต่างๆที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างลำ อิเล็กตรอนปฐมภูมิกับผิวของตัวอย่าง ส่วนที่สำคัญที่สุดของช่องใส่ตัวอย่างคือ ฐานวางตัวอย่าง (specimen stage) และปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆ เพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เคลื่อนไปมาภายในช่องใส่ตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง คือในแนวนอนหรือแนวราบ 4 ทิศทาง (X,Y direction) และแนวตั้งขึ้นลง (2 movements) นอกจากนี้ยังมีส่วนที่ควบคุมการเอียง (tilt) และการหมุน (rotate) ของตัวอย่างได้รอบทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า goniometer stage

ช่องใส่ตัวอย่างของ SEM สมัยใหม่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนในซึ่งอยู่ใต้ฐาน column หรืออยู่ใต้เลนส์ชุดสุดท้าย อีกส่วนหนึ่งของช่องตัวอย่างเป็นส่วนนอกมีลักษณะเป็นช่องเล็กกว่าส่วนใน ช่องเล็กนี้เป็นช่องแรกสำหรับเตรียมการเพื่อสอดใส่ตัวอย่างเข้าสู่ภายในซึ่งมีฐานตัวอย่าง โดยไม่ต้องทำให้ column สูญเสียสุญญากาศ นั้นหมายความว่าตัวอย่างที่ต้องการจะตรวจสอบจะต้องใส่ในช่องเล็ก แล้วดูดอากาศในช่องเล็กออกไปให้เป็นสภาวะสุญญากาศ จึงจะเปิดประตูกั้นระหว่างช่องเล็กภายนอกกับช่องใหญ่ภายใน เพื่อสอดใส่ตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องเล็กที่มีชื่อเฉพาะว่า air-lock chamber

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (collector & scintillator)

เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติก ฉาบผิวด้วยอลูมิเนียม และส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุขนาด 30-250 โวลต์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณชนิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิอยู่ภายในช่องใสตัวอย่างและได้จัดวางไว้ให้ทำมุมกับฐานตัวอย่าง เพื่อรวบรวมประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (imaging & photographic devices)

ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับให้เป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกไว้ด้วยกล้องถ่ายภาพแบบง่าย ๆ อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อหน้าแสง และเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชนิดนี้จะถูกจับ และรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อหน้าแสง (light pipe) ในลักษณะของแสง (photons) แสงที่ส่งผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิดโฟตอนนี้เป็นอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน console unit

ลำแสงไฟฟ้าบนจอรับภาพ (CRT) สามารถบันทึกได้โดยกล้องถ่ายภาพ ซึ่งการถ่ายภาพในรูปแบบนี้เป็นการบันทึกลำแสงเป็นเส้นที่เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาด้านจอ CRT เส้นแล้วเส้นเล่าจนเต็มจอภาพ ซึ่งใช้เวลาทั้งสิ้นประมาณ 1 นาที ภาพถ่ายที่ปรากฏคือการประกอบของเส้นขาวดำที่มีความสว่างและความมืด แตกต่างกันเป็นจำนวนถึง 2500 เส้นต่อภาพโดยประมาณ फिल्मที่ใช้บันทึกภาพนั้นเป็นฟิล์มขาวดำธรรมดา

2.3.1.2 การกำเนิดของภาพ กลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิดจาก electron gun ถูกรวบรวมโดยระบบเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-50 nm ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมินี้จะถูกกำหนดให้ตกลงบนผิวของตัวอย่าง พร้อมกับถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกตันให้เคลื่อนไปบนผิวของตัวอย่างโดย scan coils ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างก็จะเกิดสัญญาณออกมาหลายรูปแบบ และสัญญาณเหล่านี้สามารถจับไว้หรือรวมไว้แล้วเปลี่ยนแปลงให้เป็นภาพซึ่งถ่ายไว้ได้

เมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับตัวอย่างจะเกิดปฏิกริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวตัวอย่าง ทำให้มีอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำหนีออกมาจากชั้นบางของพื้นผิว (ไม่เกิน 5 nm) อิเล็กตรอนประเภทนี้บางประจําอาจหนีออกมาไม่ได้เพราะถูกดูดกลับเข้าชั้นในตัวอย่าง (ส่วนที่ลึกเกิน 5 nm) ก็สูญหายไปเป็นที่สุด ประจําอิเล็กตรอนบริเวณชั้นบนของผิวตัวอย่างที่หลุดออกมาจะถูกจับและรวมเป็นสัญญาณโดย collector และ scintillator ซึ่งสัญญาณนี้จะเปลี่ยนไปเป็นโฟตอนของแสง และจะถูกส่งผ่านท่อนำแสงไปยัง photomultiplier ซึ่งจะเปลี่ยนโฟตอนไปเป็นอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนชุดหลังจะถูกขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดย amplifier ให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ในที่สุดสัญญาณไฟฟ้าเหล่านี้ถูกแปรไปเป็นภาพขาวดำที่ปรากฏบนจอโทรทัศน์ หรือจอภาพ CRT และพร้อมที่จะบันทึกภาพที่เกิดจากความแตกต่าง (contrast) ระหว่างความสว่าง (ขาว) กับความมืด (ดำ) บนจอภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ

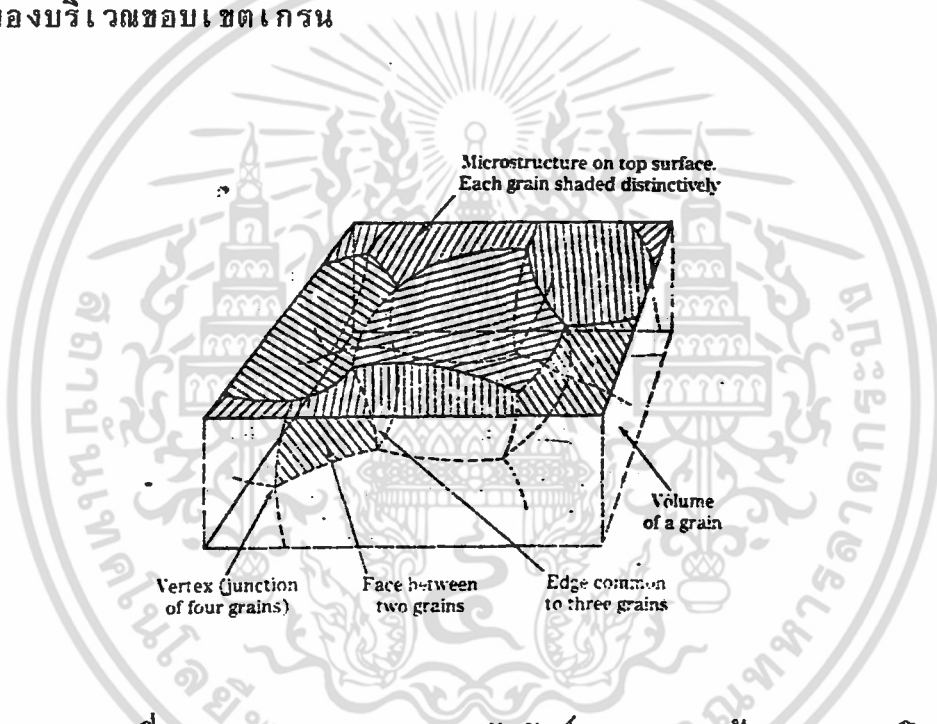
ภาพที่ปรากฏบนจอภาพ CRT เป็นภาพขยายของบริเวณเล็กเหลี่ยมจตุรัสของพื้นผิวที่ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านในช่วงเวลานั้น การที่จะเพิ่มหรือลดกำลังขยายของภาพ จำต้องควบคุมเนื้อที่ที่ลำแสงอิเล็กตรอนครอบคลุม เช่นกำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิส่องกราดไปบริเวณจตุรัสขนาดเล็ก ภาพที่ปรากฏจะเป็นภาพขยายขนาดใหญ่หรือในทางกลับกัน หากกำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในบริเวณที่กว้างใหญ่ ภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็เป็นภาพที่มีกำลังขยายต่ำ

2.3.2 การแบ่งแยกขอบเขต (Grain boundary)

การแบ่งแยกขอบเขตเป็นความไม่สมบูรณ์ของผิวหน้าในสารพหุผลึก ซึ่งแบ่งแยกเกรน (ผลึก) ในทิศทางระนาบที่แตกต่างกัน ในการแบ่งแยกขอบเขตเกรนของโลหะจะเกิดชั้นระหว่างการรวมตัวเป็นของแข็ง เมื่อผลึกจัดรูปจากอะตอมที่แตกต่างกันเกิดขึ้นในทันทีทันใด รูปร่างของการแบ่งแยกขอบเขตเกรนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกกำหนดโดยข้อจำกัดของการเกิดขึ้นของเกรนข้างเคียง ขอบเขตผิวหน้าเกรนของโครงสร้างเกรนที่เท่ากันอย่างคร่าวๆ แสดงในรูปที่ 2.19

การแบ่งแยกขอบเขตเกรนเป็นบริเวณแคบๆระหว่างเกรน 2 เกรนที่มีความกว้างประมาณเส้นผ่าศูนย์กลางของอะตอม 2-5 อะตอม และเป็นบริเวณของอะตอมที่ไม่พอดีกันระหว่างเกรนที่อยู่ติดกัน กลุ่มของอะตอมในการแบ่งแยกขอบเขตเกรนจะมีจำนวนน้อยกว่าภายในเกรนเพราะความไม่พอดีกันของอะตอม บางครั้งการแบ่งแยกขอบเขตเกรนจะมีบางอะตอมในตำแหน่งที่อัดแน่น เมื่อเพิ่มพลังงานของบริเวณขอบเขตเกรน



รูปที่ 2.18 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของโครงสร้างสารผลึกแบบ 2 มิติ ไปยังเส้นโครงร่าง 3 มิติ เฉพาะส่วนของปริมาตรโดยรวมและผิวหน้าโดยรวมของเกรน 1 เกรน

2.3.3 ขนาดเกรน (Grain size)

ขนาดเกรนของสารโลหะผลึกเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากจำนวนของผิวหน้าขอบเขตเกรนเป็นผลกระทบที่สำคัญ ต่อคุณสมบัติหลายประการของสาร โดยเฉพาะความแข็ง ที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิเอกสาร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอมละลาย) ขอบเขตเกรนทำให้โลหะแข็งโดยจำกัดการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมของอะตอมภายใต้ความเครียด. ที่อุณหภูมิสูงขึ้นขอบเขตเกรนจะค่อยๆ เกิดขึ้นและกลายเป็นบริเวณที่อ่อนภายในโลหะพหุผลึก

ทฤษฎีที่ใช้วัดหา grain size คือทฤษฎี ASTM (American Society for Testing and Material) ในกรณีนี้จำนวนขนาดเกรนนิยามโดย

$$N = 2^{n-1} \text{ ----- (8)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนของเกรนต่อตารางนิ้ว บนผิวหน้าสารที่ ถูกขีดและกัดกร่อนที่ขนาดขยาย 100 เท่า

n คือ จำนวนเต็มโดยอ้างอิงถึงตัวเลข ขนาดเกรน ASTM



รูปที่ 2.19 แสดงบางตัวอย่างของขนาดเกรนสำหรับตัวอย่างที่เป็นแผ่นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ

บทที่ 3

การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสาร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสารที่สร้างขึ้นเองประกอบด้วย ระบบควบคุมการระเหยสารโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้วัดความหนาของฟิล์มที่ต้องการ และควบคุมการระเหยสาร ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ เพื่อให้แผ่นรองรับมีอุณหภูมิตามที่ต้องการซึ่งมีผลต่อการจัดตัวเป็นรูปร่างผลึกของสารที่ระเหยขึ้นไปติดบนแผ่นรองรับ และระบบแอนนัลสาร เป็นการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฟิล์มภายหลังการระเหยสารเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้สารจัดตัวเป็นรูปร่างผลึกที่สมบูรณ์ โดยแต่ละระบบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 ระบบวัดความหนาและควบคุมการระเหยสารโดยใช้คอมพิวเตอร์

ใช้วัดและควบคุมความหนาของฟิล์มที่ต้องการ เนื่องจากความหนามีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของฟิล์ม โดยใช้หลักการคือ ใช้คริสตอล 4 เมกกะเฮิร์ต เป็นมอโนเตอร์ เมื่อสารถูกระเหยขึ้นไปในสุญญากาศเกาะติดบนแผ่นรองรับ และเกาะติดที่คริสตอลด้วย ทำให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ความถี่นี้จะถูกประมวลผลในคอมพิวเตอร์ โดยผ่านอินพุทเอาต์พุทพอร์ท (I/O Port 8255) และจะบอกถึงค่าความหนาของฟิล์มบางได้

3.1.1 ฮาร์ดแวร์

การ์ดที่ใช้ในการอินเทอร์เฟสกับไมโครคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยส่วนสำคัญๆ ดังนี้

3.1.1.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator circuit)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความถี่ของคริสตอลให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า โดยใช้คริสตอล 4 เมกกะเฮิรต์ เป็นตัวกำเนิดความถี่

3.1.1.2 วงจรสร้างฐานเวลา (Time base) ทำหน้าที่

สร้างพัลส์ ที่มีความกว้างเท่ากับ 1 วินาที เพื่อให้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรออสซิลเลเตอร์ผ่านการเปิดเกตเข้าไปยังวงจรมอนอสเตเบิล เท่ากับความกว้างของพัลส์

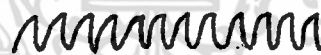
3.1.1.3 แอนด์เกต (AND gate) ทำหน้าที่ในการจำกัด

เวลาให้ความถี่ของคริสตอลผ่านเข้าไปในวงจรมอนอสเตเบิลครั้งละ 1 วินาที โดยมีอินพุต 2 เส้น คือ สัญญาณความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์ 1 เส้น และสัญญาณจากวงจรสร้างฐานเวลา 1 เส้น เอาท์พุทของแอนด์เกตสามารถแสดงดังรูป

อินพุตจาก time base



อินพุตจาก oscillator



เอาท์พุทของ AND gate



3.1.1.4 วงจรโมนอสเตเบิล (Monostable) ทำหน้าที่

สร้างพัลส์เล็กๆ สำหรับเป็นสัญญาณตรึง I/O port 8255 เพื่อให้ I/O port 8255 ส่ง "1" ไปเคลียร์แค่น์เตอร์ โดยใช้เอาท์พุทของวงจรฐานเวลาเป็นอินพุทจะได้เอาท์พุทของวงจรโมนอสเตเบิลแสดงดังรูป

อินพุตจากวงจร time base



เอาท์พุทของ monostable



3.1.1.5 วงจรมอนอสเตเบิล ทำหน้าที่นับความถี่ของคริสตอลและ

สามารถรีเซตแค่น์เตอร์เพื่อทำการเคลียร์ข้อมูลได้ทุกครั้งก่อนการนับในช่วงต่อไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.6 อินพุท-เอาต์พุทพอร์ท 8255 ในระบบวัดความหนาแน่น จะใช้อินพุท-เอาต์พุทพอร์ท 8255 จำนวน 2 ตัว ในการเชื่อมต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์ โดยมีการถอดรหัสเพื่อกำหนดตำแหน่งแอดเดรสที่ใช้งานไว้สำหรับ 8255 ทั้งสองตัว

- IC 8255 ตัวแรก พอร์ท A, B และ C จะทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ทโดยพอร์ททั้งสาม จะเชื่อมต่อกับเอาต์พุทของวงจรมุมนำกระแส
- IC 8255 ตัวที่สอง พอร์ททั้งสามของ IC ตัวนี้ จะถูกกำหนดให้ทำหน้าที่ต่างกันคือ พอร์ท A และ C จะทำหน้าที่เป็นเอาต์พุทพอร์ท ส่วนพอร์ท B จะทำหน้าที่เป็นอินพุทพอร์ท

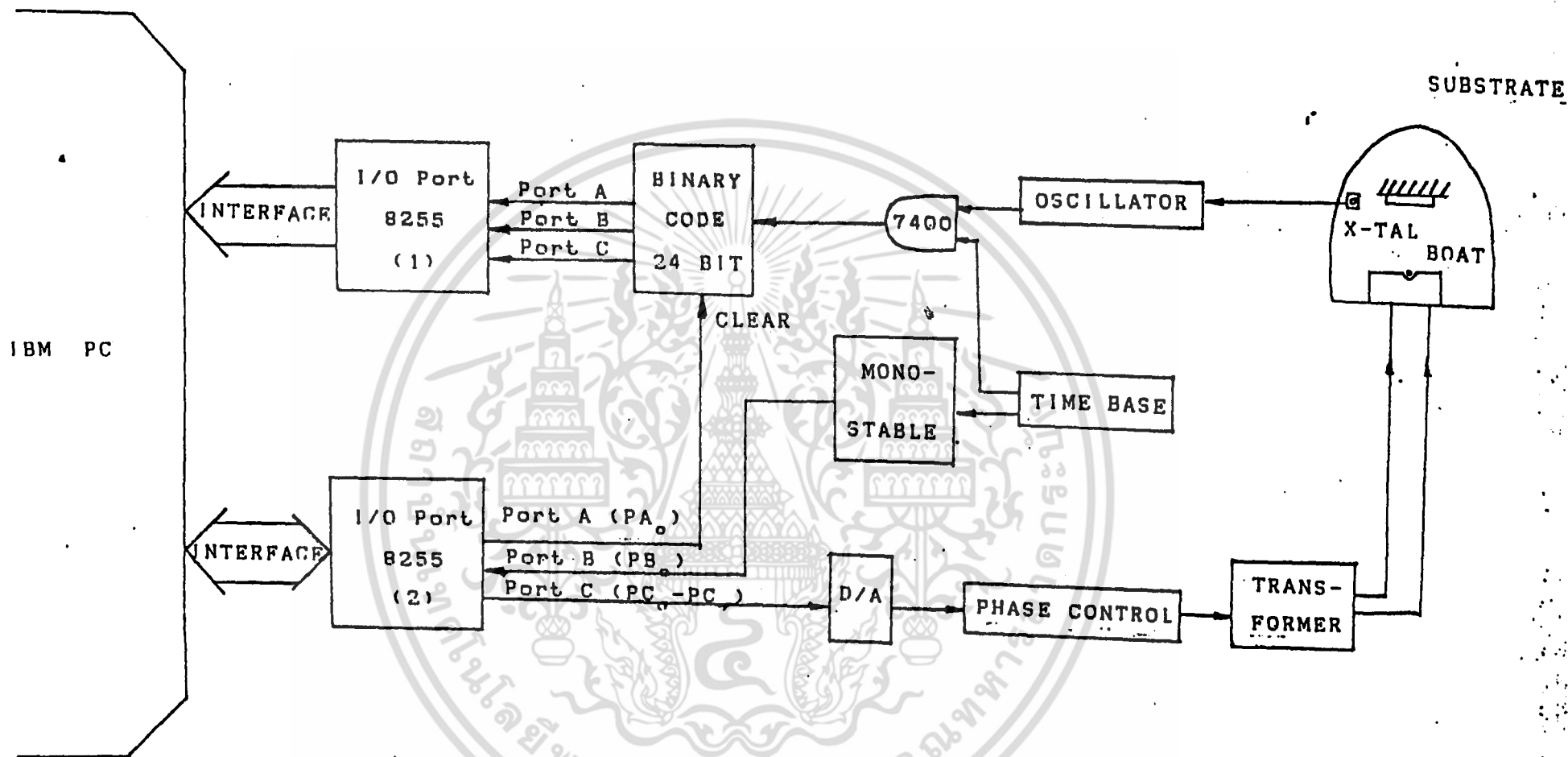
3.1.1.7 วงจรถอดรหัส (Decoder) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการถอดรหัสเพื่อเลือกใช้งาน 8255 ให้ถูกต้องตามแอดเดรสที่กำหนด

3.1.1.8 วงจร Digital to Analog Converter ทำหน้าที่แปลงค่าเอาต์พุทที่ได้จากพอร์ท C ของ 8255 ตัวที่สองให้เป็นค่าโวลต์เตจของหม้อแปลงที่ใช้ในการระเหยสาร

สำหรับวงจรที่ใช้ควบคุมการให้ความร้อนแก่โบทคือ

3.1.1.9 วงจรควบคุมไฟฟ้าเชิงสัดส่วน (Phase control) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ในการระเหยสาร โดยควบคุมการนำกระแสของไดรแอดซึ่งจะทำงานตามช่วงเวลาที่ถูกกำหนด โดยมีมุมนำกระแส (β) โดยมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ในการระเหยสารซึ่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมุมนำกระแส = 180° และน้อยที่สุดเมื่อมุมนำกระแส = 0° การที่มุม β จะมีค่าเป็นเท่าใดนั้นจะถูกกำหนด โดยสัญญาณอนาลอกจากวงจร Digital to analog

ระบบทั้งหมดนี้แสดงไว้ในแผนผังดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงระบบวัดความหนาและควบคุมการระเหยสารโดยใช้คอมพิวเตอร์

3.1.2 ซอฟต์แวร์

ในโปรแกรมจะมีการรับค่าตัวแปรคือ

1. ความหนาของฟิล์มที่ต้องการ (t)
2. อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อ 1 วินาที (rate)
3. ค่าความไวของคริสตอล (S)
4. ค่าความหนาแน่นของสารที่นำมาใช้ในการระเหย (ρ)
5. พื้นที่ที่ใช้ในการรับสารของคริสตอล (A_x)
6. ค่าความร้อนเริ่มต้นที่ใช้ในการระเหยสาร (heat)

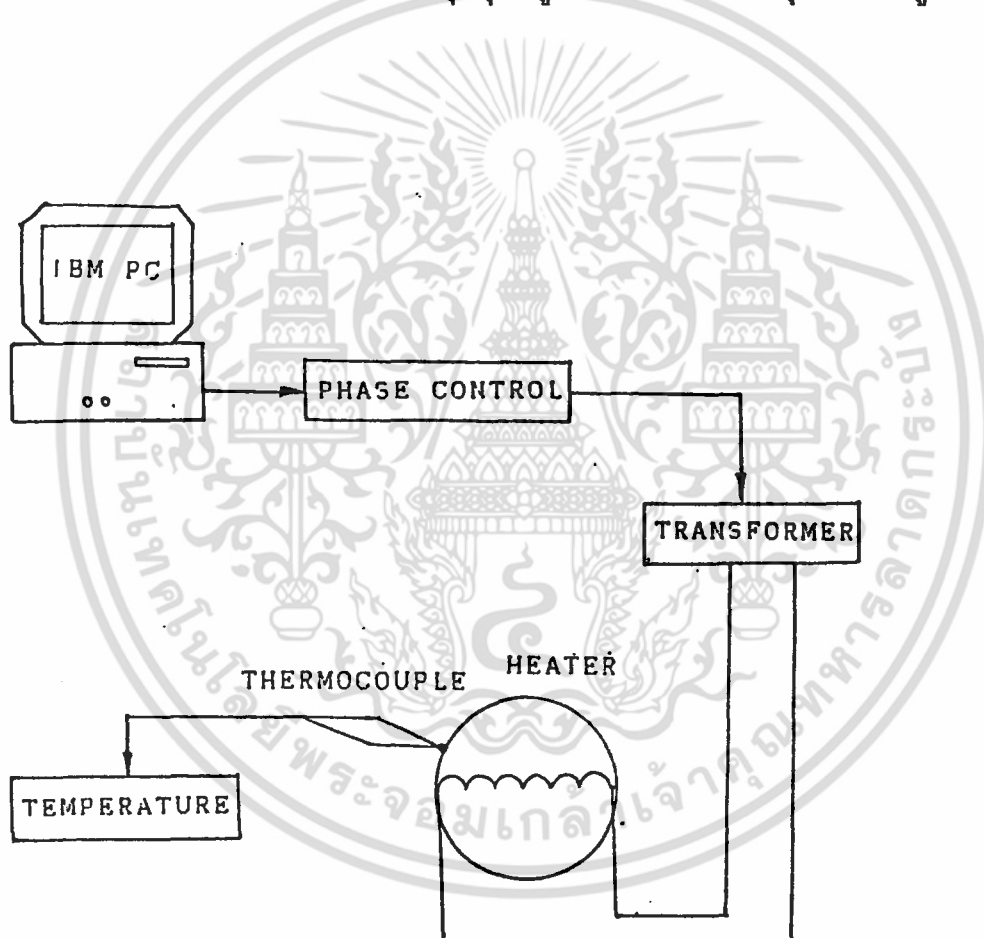
จากนั้นจะนำค่าความร้อนเริ่มต้นที่ใช้ในการระเหยสารผ่าน Port C_2 ไปยังวงจร Digital to analog เพื่อแปลงเป็นค่าโวลต์เตจสำหรับควบคุมอุปกรณ์กำเนิดความร้อนภายนอก (Phase control และ Transformer) จากนั้นทำการตรวจสอบสัญญาณ Monostable ทาง Port B_2 ถ้าสัญญาณ Monostable เป็น "1" จะทำการอินพุตค่าความถี่ของคริสตอลที่ผ่านการนับแต่ละวินาที โดยอินพุตจาก Port A_1 , Port B_1 และ Port C_1 เมื่อสิ้นสุดการอินพุตความถี่จะทำการส่งค่า "1" และ "0" ผ่าน Port A_2 เพื่อทำการเคลียร์เคาน์เตอร์และเซตเคาน์เตอร์ให้พร้อมที่จะนับในวินาทีต่อไป นำความถี่ที่ได้มาเปรียบเทียบกับความถี่ที่ต้องเปลี่ยนไปแล้วจะได้ความหนาที่ผู้ใช้ต้องการ ซึ่งคำนวณได้จากสูตร $t = f_s - f_u / k$ โดย $k = \rho SA_x$ ถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะระเหยสารมีค่าน้อยกว่าความถี่ที่กำหนดขึ้นโดยความหนา โปรแกรมจะวน loop ไปทำการระเหยสารต่อไป แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงความถี่ขณะการระเหยสารมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับความถี่ที่กำหนดโดยความหนา ก็จะหยุดการระเหยสารและนำค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ของการระเหยสารขณะนั้น ไปคำนวณค่าความหนาของฟิล์มบางและแสดงค่าความหนาที่คำนวณได้ออกทางจอภาพ และยังมี การนำค่าความถี่ของคริสตอลที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวินาที มาเปรียบเทียบกับค่า rate ที่ผู้ใช้กำหนด ถ้ามากกว่าก็จะมีการลดปริมาณความร้อน (heat) แต่ถ้า น้อยกว่าก็จะมีการเพิ่มความร้อน และไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนในกรณีนี้ ค่าทั้งสองเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

การให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับเพื่อให้พลังงานที่เหมาะสม แก่โมเลกุลของสารที่ระเหยขึ้นไปติดแผ่นรองรับ เพื่อให้มีการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึก การให้ความร้อนต้องควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ค่าหนึ่ง เพื่อนำมาเปรียบเทียบและสรุปผลต่อไป

ระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย อุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

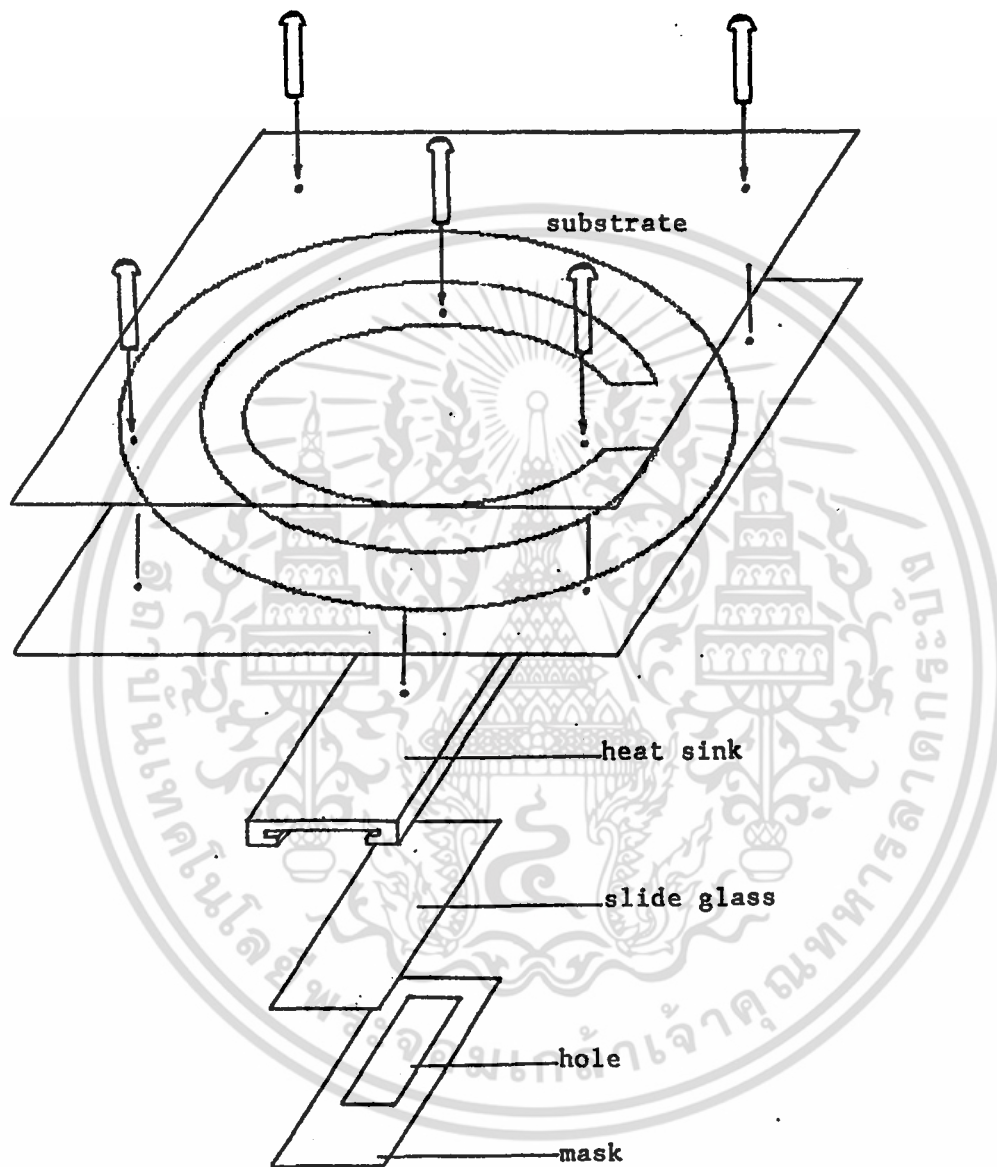
3.2.1 ชุดแสดงค่าอุณหภูมิ ใช้แสดงค่าอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่วัดได้โดยเทอร์โมคัปเปิล

3.2.2 เทอร์โมคัปเปิล ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของแผ่นรองรับโดยปลายของเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นรองรับ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในระบบเป็นชนิด K ซึ่งสายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง Ni 10% และ Cr 90% และสายลบทำจากโลหะผสม Ni 95% และ 5% ของ Al, Mn Si สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260°C (2300°F) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250°C (-420°F) นิยมใช้ในสภาวะงานที่เป็น oxidizing หรือ inert และสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน ก็สามารถวัดได้ดี

3.2.3 แผ่นรองรับ ลักษณะของชุดแผ่นรองรับประกอบด้วย

1. แผ่นอลูมิเนียมด้านบน เจาะรูสำหรับสายของแผ่นความร้อน
- 2 สายและส่วสำหรับหนีตที่ใช้ยึด 5 ตัว
2. แผ่นความร้อนของกาทัมน้ำ ซึ่งเรานำมาใช้เป็น heater
3. แผ่นอลูมิเนียมด้านล่าง เจาะรูสำหรับใส่หนีต 5 ตัว
4. ที่วางแผ่นรองรับ ซึ่งแผ่นรองรับนี้เราจะใช้กระจกสไลด์ และสำหรับวางแผ่นมาส์คด้วย ยึดกับแผ่นอลูมิเนียมด้านล่างด้วยหนีตตัวกลาง

เมื่อประกอบอุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน จะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 3.3 ลักษณะฐานของแผ่นรองรับ

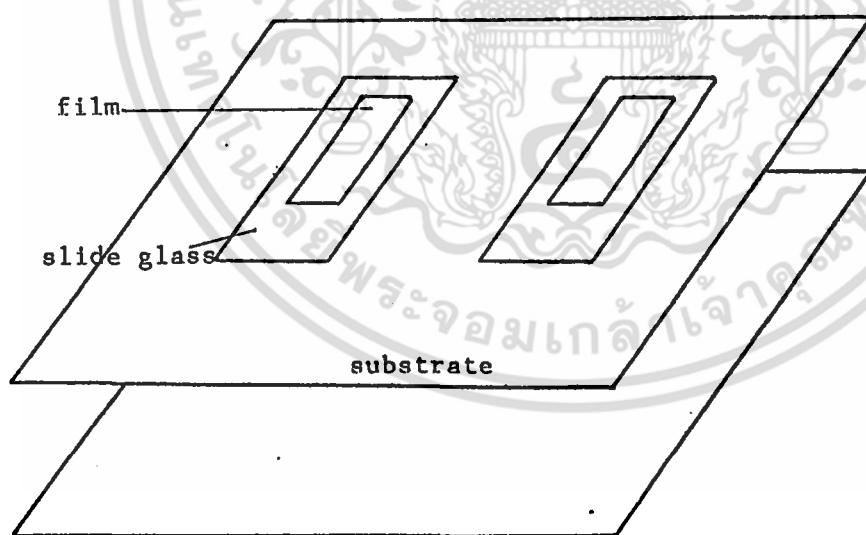
สำหรับวงจรควบคุมไฟฟ้าเชิงสัดส่วน ใช้วงจรเดียวกับระบบควบคุมการ

ระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ระบบแอนน็ลสาร

ในการแอนน็ลเพื่อให้สารที่เกาะอยู่บนฟิล์มจัดตัว เป็นโครงสร้างที่สมบูรณ์ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฟิล์มมากกว่าอุณหภูมิแผ่นรองรับขณะระเหยประมาณ 2-3 เท่า โดยระบบที่ทำการแอนน็ลต้องอยู่ในสุญญากาศเช่นกันเพื่อป้องกันออกไซด์มาเกาะติดแผ่นฟิล์มทำให้คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มผิดพลาดไป ในที่นี่ได้ใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับมาใช้ในการแอนน็ล โดยการวางแผ่นฟิล์มลงด้านบนของแผ่นอลูมิเนียมด้านบน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระบบแอนน็ลสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การเตรียมฟิล์มสารประกอบ CuInSe_2 และการวิเคราะห์แผ่นฟิล์ม

4.1 การเตรียมสารประกอบ CuInSe_2

ในการเตรียมสารประกอบ CuInSe_2 ทำโดยให้การระเหยสารชั้นไปที่ละชนิดเพื่อให้เกาะติดบนแผ่นรองรับซึ่งเป็นกระจกใส โดยขณะที่ระเหยสารชั้นไปนั้นต้องทำการกำหนดอุณหภูมิแผ่นรองรับด้วย เมื่อระเหยชั้นไปได้ครบทั้ง 3 สารแล้วต้องนำมาทำการแอนนัล จึงเป็นตัวอย่างที่สมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

4.1.1 การระเหยสารให้เกาะติดบนแผ่นรองรับ

ระบบระเหยสารมีดังรูป 4.1

โดยขั้นตอนในการระเหยสารมีดังนี้คือ

1. เปิดครอบแก้วออกใส่โลหะทองแดงลงไปในโบทพอประมาณ นำกระจกใสซึ่งใช้เป็นแผ่นรองรับตัดให้มีขนาด 2.5 cm. x 1.2 cm. ใส่ลงในฐานภายใต้ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับพร้อมกับมาส์ค ซึ่งทำโดยใช้แผ่นทองแดงเจาะเป็นช่องตามแบบที่ต้องการ ปิดครอบแก้วให้เรียบร้อยแล้วเปิดชัตเตอร์

2. ทำการสูบลูกสูบออกจนความดันลดลงเป็น 10^{-4} mbar

3. เสียบปลั๊กหม้อแปลงที่ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ รอจนกระทั่งได้อุณหภูมิแผ่นรองรับที่ต้องการ

4. เสียบปลั๊กหม้อแปลงที่ใช้กับโบท สังเกตจนโลหะในโบท หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเริ่มระเหยมาติดที่ครอบแก้ว จึงทำการเปิดชัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บันทึกค่าความถี่ขณะเริ่มระเหยสารของคริสตอล นำความถี่ที่ต้องการให้เปลี่ยนแปลงไปแล้วได้ความหนาที่ต้องการ มาหักลบกับความถี่เริ่มต้น

6. เมื่อความถี่ของคริสตอลลดลงเรื่อยๆจนถึงค่าที่ได้ความหนาที่ต้องการแล้วจึงทำการปิดชัตเตอร์ แล้วถอดปลั๊กหม้อแปลงของโบท หม้อแปลงของแผ่นรองรับ และคิฟิวชั่นปั๊ม ตามลำดับ

7. บันทึกค่าอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่ขึ้นไปสูงสุด

8. รอจนกระทั่งระบบเย็นจึงทำการปิดปั๊มสุญญากาศ

เราจะได้ฟิล์มของทองแดงมา 1 ชั้น เมื่อจะทำการระเหยสารชนิดต่อไปทำดังนี้

9. เปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปในครอบแก้ว

10. เปิดครอบแก้วออกแล้วทำความสะอาดครอบแก้ว และระบบโดยทั่วๆไปโดยใช้อะซิโตน

11. เปลี่ยนโบทเป็นโบทของซิลิเนียม ใส่ซิลิเนียมลงไปพอประมาณ ใช้กระจกสไลด์แผ่นเดิมที่มีฟิล์มทองแดงอยู่แล้ว ปิดครอบแก้วแล้วปิดชัตเตอร์ ทำตามข้อ 2-9 สำหรับขั้นต่อไปก็เช่นเดียวกัน

4.1.2 การแอนนัลแผ่นฟิล์ม

ขั้นตอนในการแอนนัลแผ่นฟิล์ม คือ

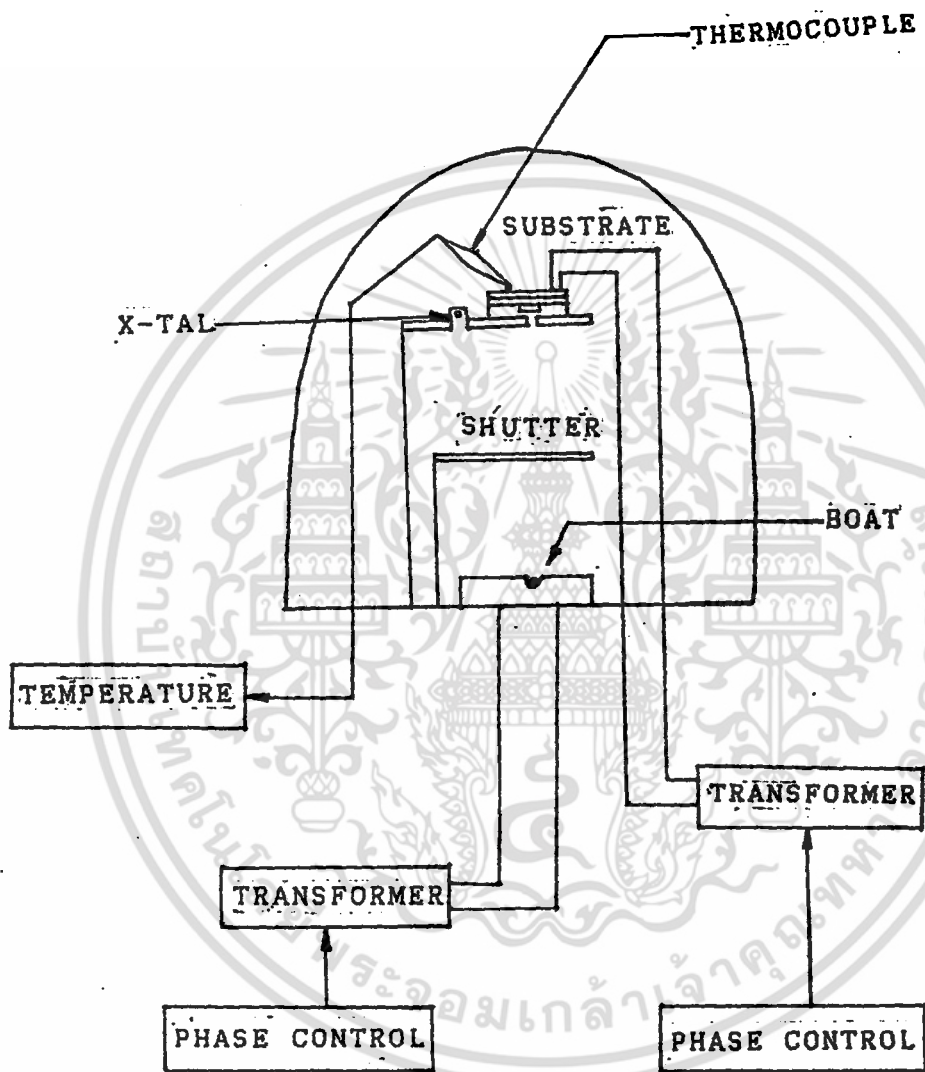
1. นำแผ่นรองรับซึ่งมีฟิล์มของ CuInSe_2 ติดอยู่เรียบร้อยแล้ว มาวางบนระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

2. ปั๊มระบบให้เป็นสุญญากาศเช่นเดียวกับตอนระเหยสาร

3. เสียบปลั๊กหม้อแปลงซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

4. รอจนได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วเริ่มจับเวลา จนถึงประมาณ 2 ชั่วโมงแล้วจึงปิดปั๊ม และรอจนระบบเย็น

จะได้แผ่นฟิล์มที่ทำการแอนนัลเรียบร้อยแล้ว พร้อมทั้งจะนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆได้



รูปที่ 4.1 ระบบระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เงื่อนไขของฟิล์ม

ในการระเหยสารได้กำหนดเงื่อนไขของฟิล์มดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในการระเหยสาร

Sample	สาร	f_s	f_r	Δf	T_s	V
S1	Cu	3.815314	3.813314	2000	120	220
	Se	3.811528	3.807528	4000	125	70
	In	3.8006268	3.0796268	4000	150	200
S2	Cu	3.795530	3.793530	2000	140	180
	Se	3.7997	3.7957	4000	140	60
	In	3.7952	3.7912	4000	135	160
S3	Cu	3.794060	3.792060	2000	100	220
	Se	3.782242	3.778242	4000	100	60
	In	3.779182	3.775182	4000	100	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S4	Cu	3.774401	3.773401	1000	100	220
	Se	4.192424	4.190424	2000	100	60
	In	4.190646	4.188646	2000	90	180
S5	Cu	4.197719	4.197009	700	100	220
	Se	4.196580	4.195180	1400	100	60
	In	4.195083	4.193683	1400	100	180

$f_{\text{u}}, f_{\text{r}}$ (MHz) = ความถี่ของคริสตัลก่อนและหลังการระเหยสาร

Δf = ค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วได้ความหนาที่ต้องการ

T_{u} (°c) = ค่าอุณหภูมิของแผ่นรองรับเมื่อเริ่มการระเหยสาร

V (Volt) = โวลต์เตจที่ใช้ในการระเหยสาร

ซึ่งสามารถหาความหนาของแผ่นฟิล์มได้จากสูตร

$$t = (f_{\text{r}} - f_{\text{u}}) / k \quad \text{โดย } k = \rho SA_x$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดั่งตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนาของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

Sample	สาร	t	t _Σ
S1, S2, S3	Cu	1.6	11.94
	Se	6.4	
	In	3.94	
S4	Cu	0.8	5.97
	Se	3.2	
	In	1.97	
S5	Cu	0.5625	4.1815
	Se	2.24	
	In	1.379	

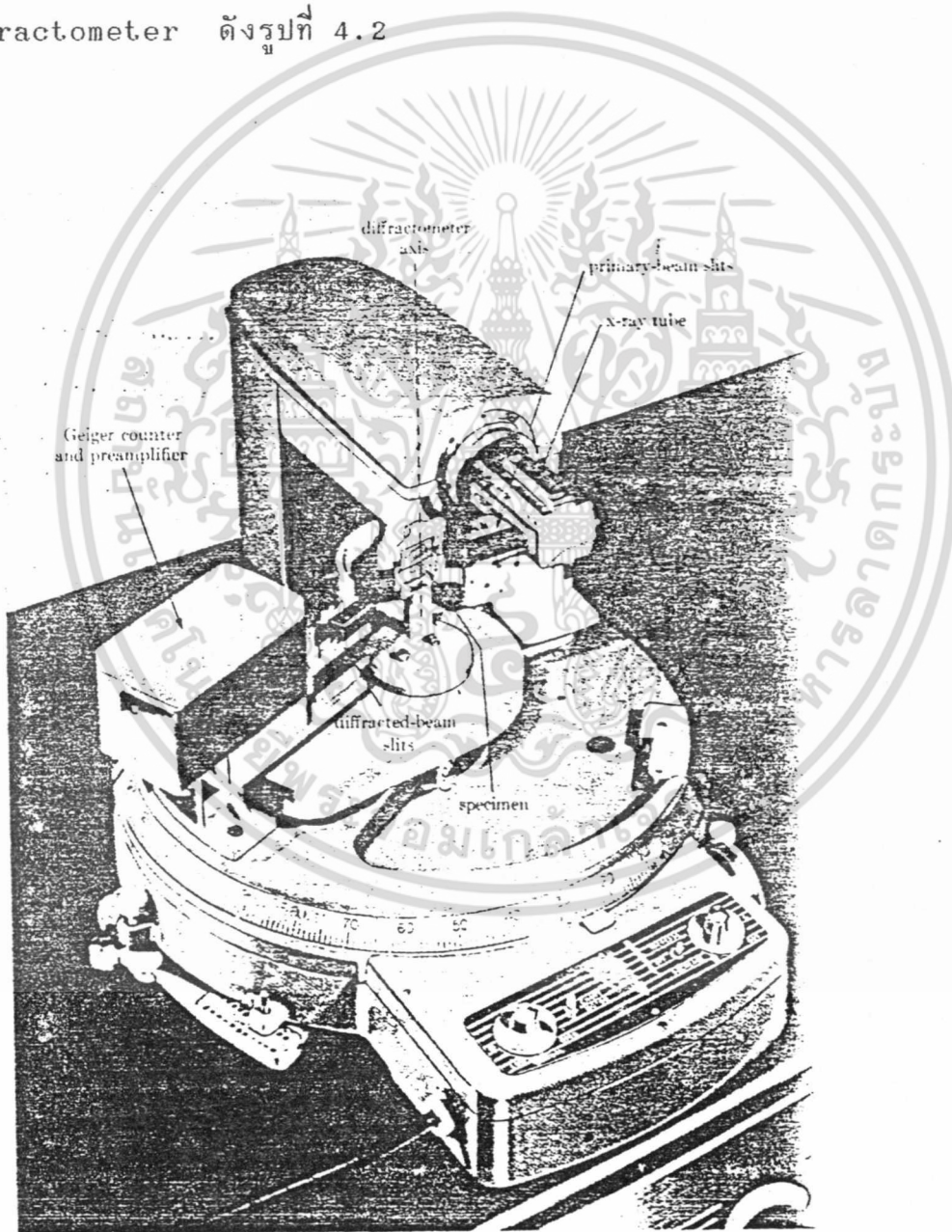
t (μm) = ความหนาของฟิล์มแต่ละชั้น

t_{Σ} (μm) = ความหนาของฟิล์มรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

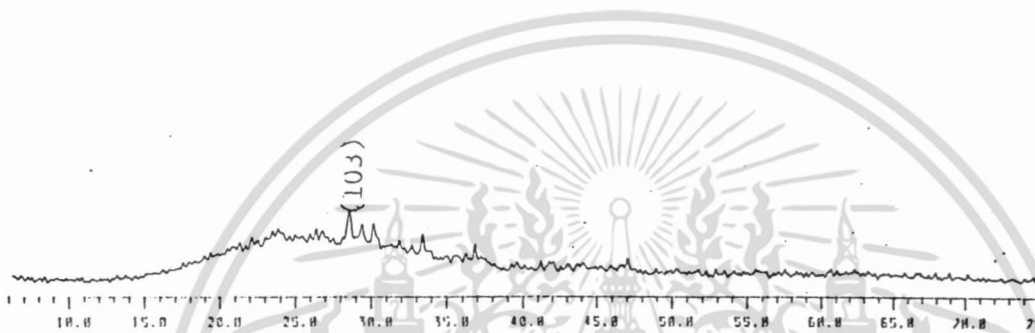
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกโดยวิธี X-Ray diffraction

จากการเตรียมสาร CuInSe_2 ตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.1 ได้แผ่นฟิล์มตัวอย่างนำไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer ดังรูปที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.2 เครื่อง X-ray Diffractometer
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

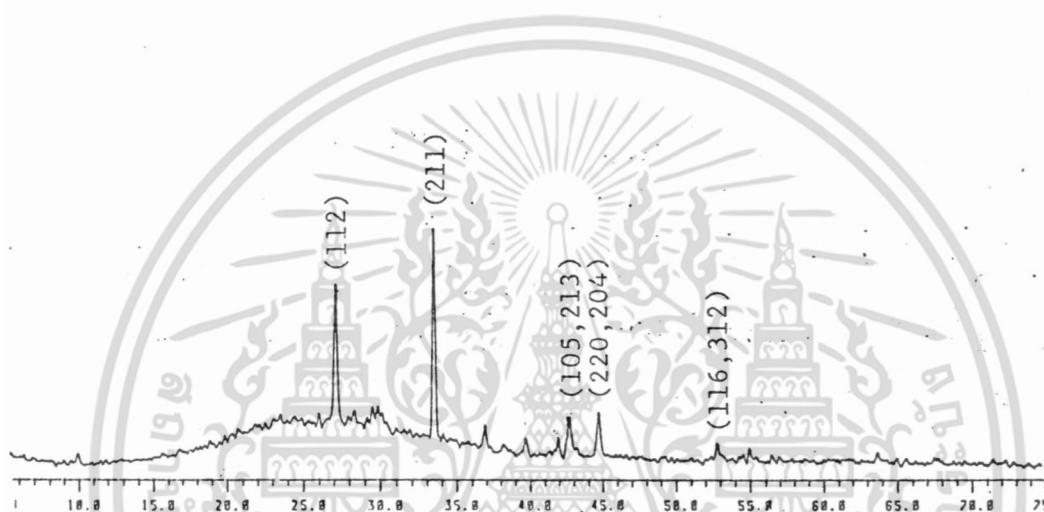
จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2 เราจะได้
กราฟแสดงระนาบของผลึก ดังรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 1

จากกราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 1 (รูปที่ 4.3) เมื่อนำไป
เปรียบเทียบกับ ASTM DATA CARD ของสารประกอบ CuInSe_2 ในภาคผนวก ค.
จะได้ค่าระนาบที่เป็นลักษณะของผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ คือ (103) ซึ่งสามารถนำ
มาคำนวณค่าคงที่ของแลททิซจากสมการของ Tetragonal ในตารางที่ 2.2 ได้
เท่ากับ 5.259 \AA

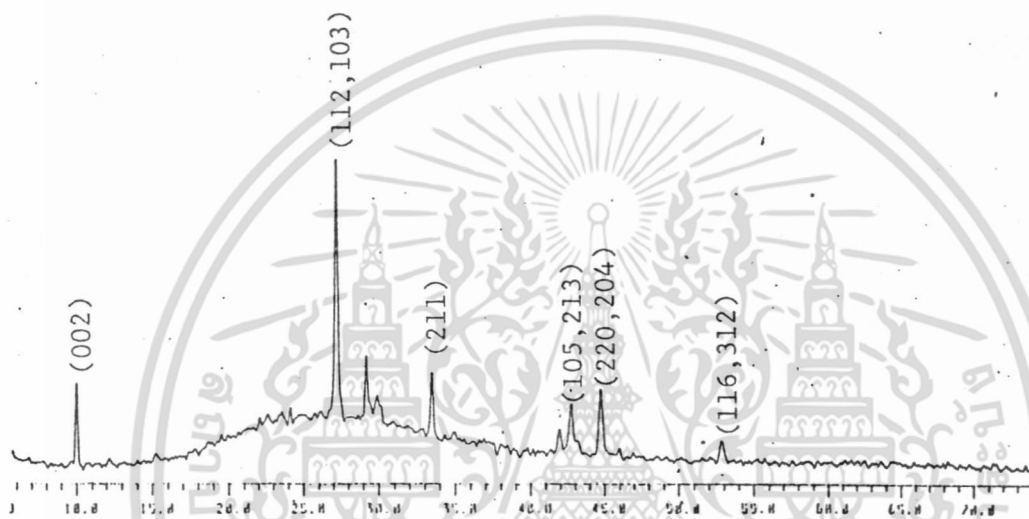
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 2

จากกราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 2 (รูปที่ 4.4) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ ASTM DATA CARD ของสารประกอบ CuInSe_2 ในภาคผนวก ค. จะได้ค่าระนาบที่เป็นลักษณะของผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ คือ (112), (211), (105,213), (220,204), (116,312) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าคงที่ของแลททิซจากสมการของ Tetragonal ในตารางที่ 2.2 ได้เท่ากับ 5.633 \AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



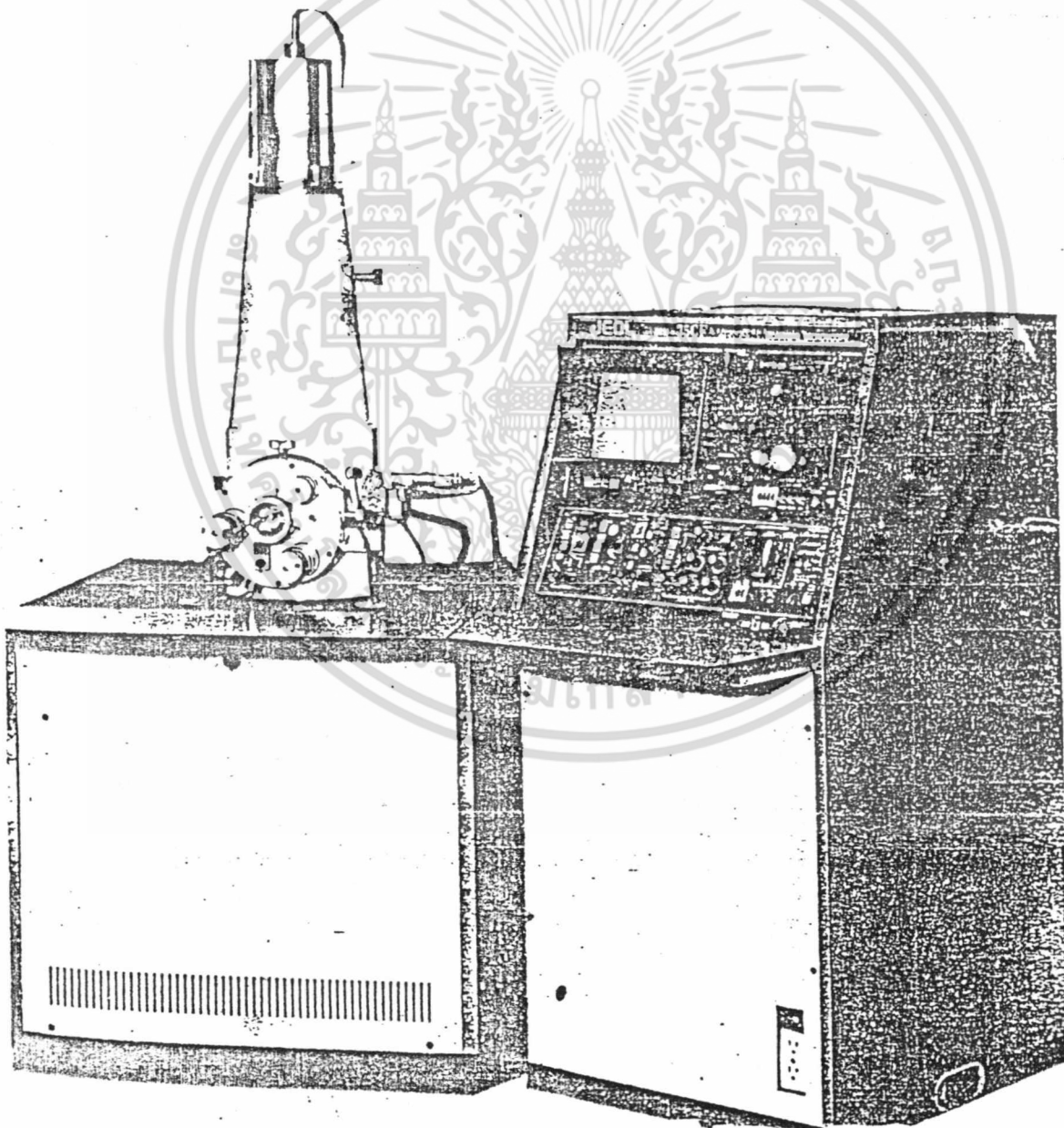
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 3

จากกราฟแสดงระนาบของผลึกของตัวอย่างที่ 3 (รูปที่ 4.5) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ ASTM DATA CARD ของสารประกอบ CuInSe_2 ในภาคผนวก ค. จะได้ค่าระนาบที่เป็นลักษณะของผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ คือ (112), (211), (105, 213), (220, 204), (116, 312) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าคงที่ของแลททิซจากสมการของ Tetragonal ในตารางที่ 2.2 ได้เท่ากับ 5.633 \AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

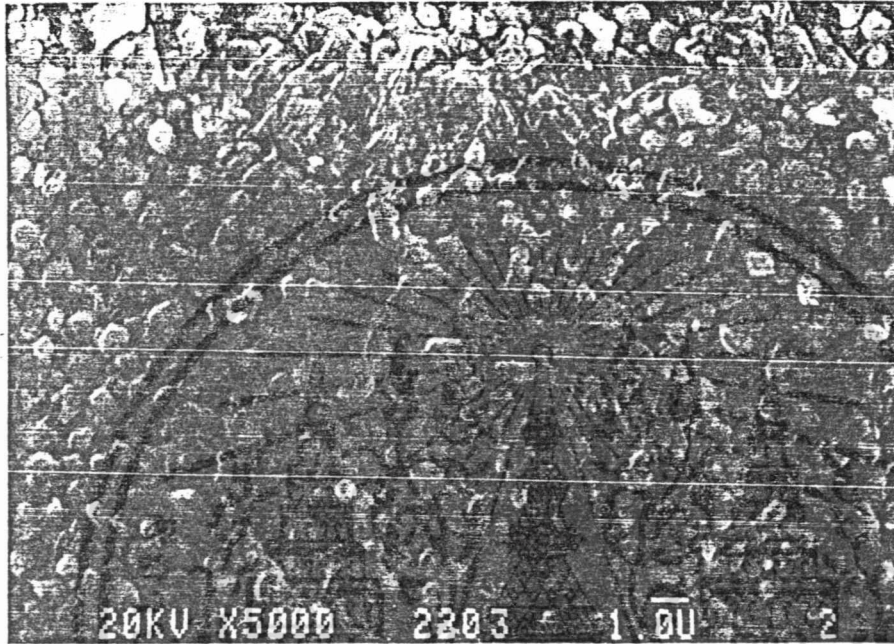
4.4 การวัดค่าขนาดของเกรน (Grain Size) โดยวิธี Scanning Electron Microscope

เมื่อได้แผ่นฟิล์มที่ทำการระเหยสารเสร็จแล้ว ซึ่งมีทั้งที่ผ่านการแอนนัลแล้วและยังไม่แอนนัล นำไปดูผิวหน้าของแผ่นฟิล์มและทำการวัดขนาดของเกรนที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope ดังรูปที่ 4.6

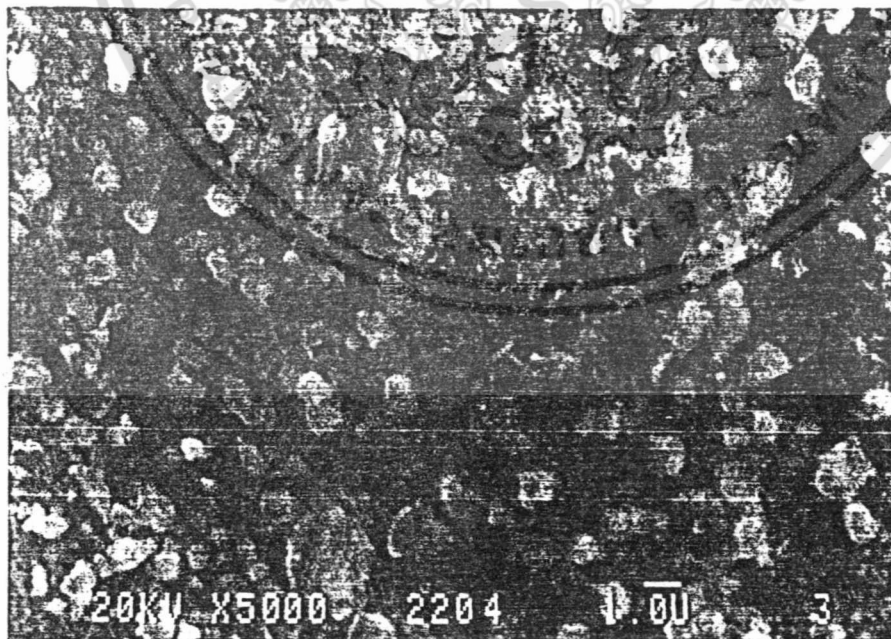


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ขออนุญาตให้มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4.6 เครื่อง Scanning Electron Microscope
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาขนาดของเกรนของผลึกจากฟิล์มบาง CuInSe_2 เราจะได้
ภาพแสดงขนาดของเกรน ดังรูป 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11

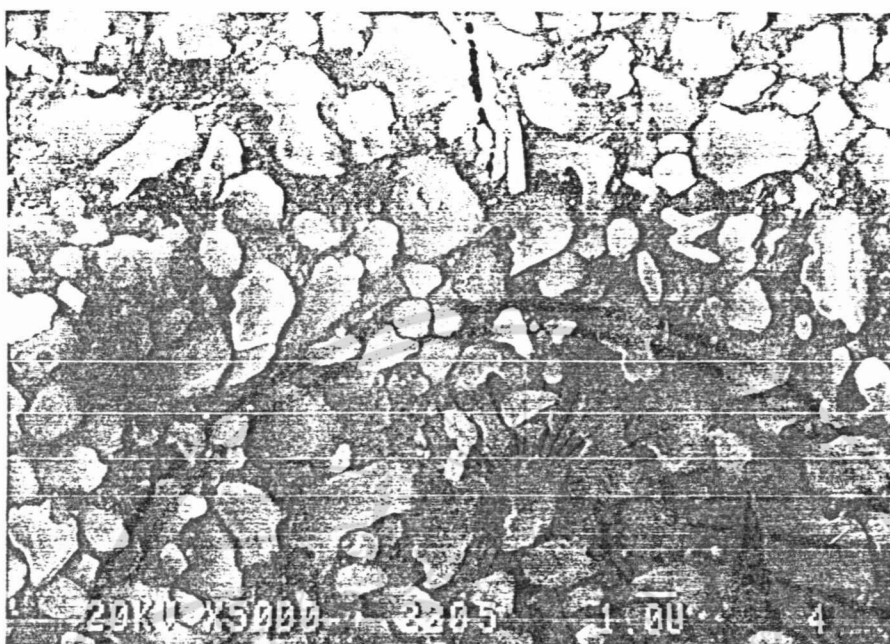


รูปที่ 4.7 ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 1

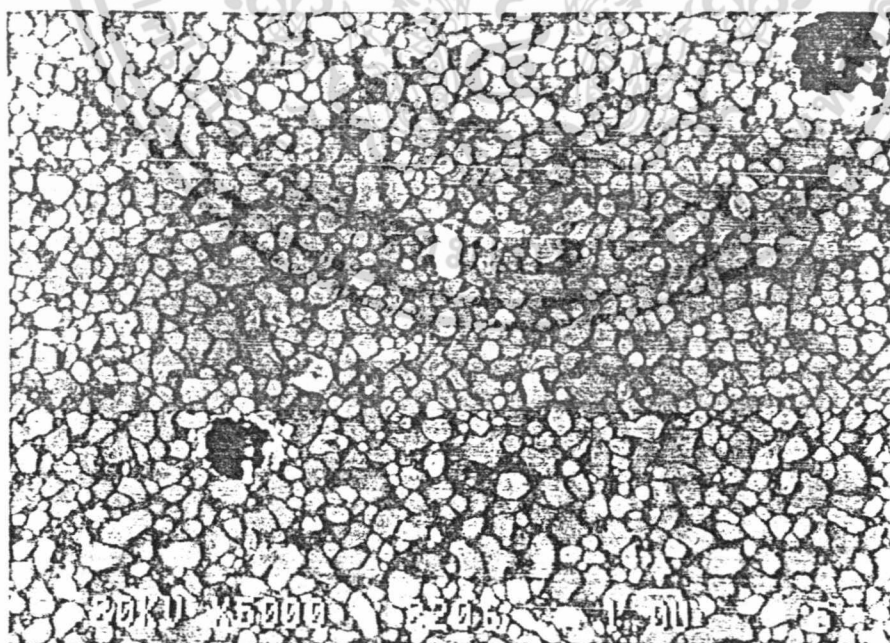


รูปที่ 4.8 ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.10 ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพแสดงขนาดของเกรนของตัวอย่างที่ 5

จากภาพแสดงขนาดของเกรนของผลึก เราสามารถหาค่าขนาดของเกรนของผลึก (Grain Size) จากสมการที่ 8 ได้ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดง Grain size number

ตัวอย่างที่	Nominal number of grains per in ² at 5000 x	Grain size number
1	32	6
2	22	5.46
3	15	4.91
4	64	7
5	75	7.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ เราได้นำระบบระเหยสารและควบคุมความหนาโดยไม่โครคอมพิวเตอร์มาใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของ CuInSe_2 จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้มาทำการศึกษาโครงสร้างผลึก และวัดค่าขนาดเกรนของผลึกซึ่งเราสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มบาง

CuInSe_2 จากแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ เมื่อนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธี X-Ray Diffraction เราจะได้กราฟแสดงระนาบของผลึกของแผ่นฟิล์มต่างๆ ดังรูปที่ 4.2-4.4 ตามลำดับ พบว่าแผ่นฟิล์มที่ 1 (รูปที่ 4.2) จะไม่ปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่แสดงถึงระนาบของผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ซึ่งมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิของแผ่นรองรับในการระเหยสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันพอสมควร ทำให้ในการแอนนัลแผ่นฟิล์มการรวมตัวกันเป็นสารประกอบ CuInSe_2 ของสารแต่ละชนิดเกิดการรวมตัวกันไม่สมบูรณ์ สำหรับแผ่นฟิล์มที่ 2 และ 3 (รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4) จะปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ชัดเจน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐานที่แสดงถึงระนาบของผลึก CuInSe_2 แบบซาลโคไฟไรท์ พบว่าเส้น (112), (211), (105, 213), (220, 204) และ (116, 312) ปรากฏให้เห็นค่อนข้างชัดเจน สาเหตุจากการที่อุณหภูมิแผ่นรองรับมีความใกล้เคียงกันมาก และจากการคำนวณค่าคงที่ของแลตติซจะมีค่าประมาณ 5.633 Å

5.1.2 ผลการวัดขนาดเกรนของผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2

เมื่อนำแผ่นฟิล์มทำการแอนนัลแล้วนำไปวัดขนาดของเกรน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธี Scanning Electron Microscope เราจะได้ภาพแสดงลักษณะขนาดเกรนของผลึก ดังรูป 4.6-4.10 ตามลำดับ พบว่าเกรนของแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนัล (รูปที่ 4.6 -4.8) ขนาดเกรนของผลึกจะมีขนาดใหญ่กว่าเกรนที่ยังไม่ผ่านการแอนนัล (รูปที่ 4.9-4.10) โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ 3 (รูปที่ 4.8) ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะผลึกมีความสมบูรณ์มากที่สุด ซึ่งขนาดของเกรนหาได้จากสมการที่ 8

5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

- ขณะป้อนให้ระบบเป็นสุญญากาศควรดูและมัดระวังระบบตลอดเวลา เช่น การปิดฝาครอบแก้วไม่สนิท ปลายของเทอร์โมคัปเปิลไม่แตะกับระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ น้ำจากคูลลิ่งปั๊มไม่ไหลเวียน น้ำจากคูลลิ่งปั๊มหยุดไปบนสายไฟหรือเครื่องปั๊มที่มีไฟฟ้า ฝาปิดครอบแก้วและครอบแก้วร้อนจัดเกินไป สายไฟที่ต่อกับระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับทำให้เกิดประกายไฟในครอบแก้ว และแผ่น Heater ที่อยู่ภายในระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ เกิดไหม้ เป็นต้น ถ้าเกิดเหตุการณ์เหล่านี้ต้องทำการปิดระบบแล้วถอดปลั๊กทันที
- การวางแผ่นรองรับและคริสตอลในระบบต้องวางให้ตรงกับช่องที่สารจะระเหยขึ้นไป
- ควรทำความสะอาดแผ่นสไลด์ที่นำมาทำเป็นแผ่นรองรับให้สะอาด และไม่ควรใช้มือจับที่แผ่นสไลด์
- เมื่อได้ฟิล์มที่ระเหยมา 1 ชั้นแล้วควรเก็บในระบบสุญญากาศถ้ายังไม่ทำการระเหยชั้นต่อไป เพื่อป้องกันออกไซด์มาเกาะที่แผ่นฟิล์ม
- ไม่ควรทำการระเหยสารติดต่อกันหลายๆครั้งเนื่องจากระบบจะร้อนทำให้เกิดความผิดพลาด
- ขณะทำการแอนนัลควรนำคริสตอลออกจากระบบเนื่องจากใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้คริสตอลเสียหายได้
- ก่อนทำการระเหยสารทุกครั้งควรตรวจสอบสายของแผ่นความร้อนเนื่องจากไม่ทนทานใช้ได้เพียง 2-3 ครั้งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เนื่องจากแผ่นความร้อนแบบกาวติดน้ำนี้ไม่สามารถทนความร้อนได้สูงจึงควรหาแผ่นความร้อนแบบอื่นเพื่อสามารถให้ความร้อนได้มากกว่านี้ จะทำให้ในการแอนนัลใช้อุณหภูมิสูงขึ้น फिल्मที่เตรียมได้จะมีคุณสมบัติต่างๆดีกว่า แต่ต้องคำนึงถึงว่าแผ่นความร้อนหรือระบบความร้อนที่นำมาใช้ต้องสามารถใช้ในระบบสุญญากาศนี้ได้
- ในการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลบางครั้งไม่ได้อุณหภูมิที่แท้จริงเนื่องจาก เทอร์โมคัปเปิลไม่สัมผัสพอดีกับระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ
- การให้อุณหภูมิแผ่นรองรับไม่สามารถเกินกว่า 300 °c
- แผ่นความร้อนไม่สามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิเกินกว่า 250 °c
- อุณหภูมิที่ให้แก่แผ่นรองรับในการระเหยสารทั้ง 3 ชนิดควรมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน
- กระจกสไลด์ที่ใช้เป็นแผ่นรองรับควรมีขนาดบางประมาณ 1 มม. หรือใช้กระจกสไลด์ที่ใช้ในเครื่อง Diffractometer เพื่อให้ได้กราฟที่แสดงระนาบผลึกที่ถูกต้องชัดเจน

ภาคผนวก ก.

อัตราส่วนของมวลของ Cu:In:Se ที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดการคำนวณอัตราส่วนของมวล Cu:In:Se เพื่อใช้ในการกำหนดอัตราการผลิตของคริสตอลทั้ง 3 จุดมีดังนี้

จากสมการ

$$\text{จำนวนอะตอม} = \text{มวลของสาร (กรัม)} \times \text{เลขอะโวคาโด} / \text{น้ำหนักโมเลกุล}$$

ในกรณีที่ ต้องการอัตราส่วนจำนวนอะตอมของ Cu:In:Se = 1:1:2 โดยที่น้ำหนักโมเลกุลของสาร Cu, In และ Se เป็น 63.54, 114.82 และ 78.96 ตามลำดับ แทนค่าในสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$1 = \text{มวลของสาร Cu} \times \text{เลขอะโวคาโด} / 63.54 \quad \text{----- (1)}$$

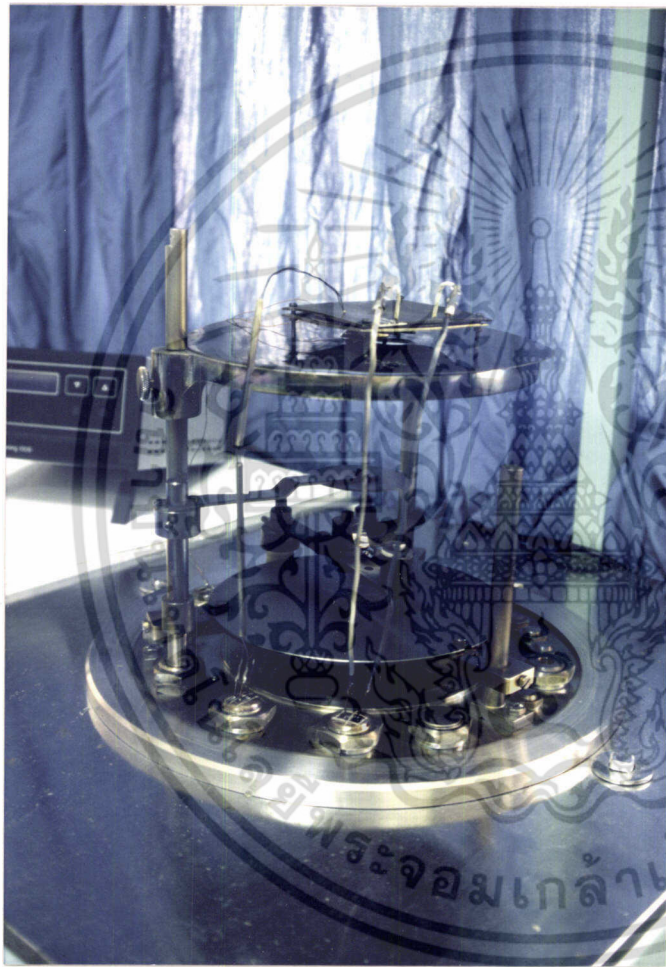
$$1 = \text{มวลของสาร In} \times \text{เลขอะโวคาโด} / 114.82 \quad \text{----- (2)}$$

$$2 = \text{มวลของสาร Se} \times \text{เลขอะโวคาโด} / 78.96 \quad \text{----- (3)}$$

แก้สมการหาค่าอัตราส่วนของมวลของสาร Cu:In:Se จะได้เท่ากับ 1:1.8:2.4 ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการผลิตของคริสตอลทั้ง 3 จุด เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการผลิตของสารให้ได้อัตราการผลิตตามที่ต้องการ

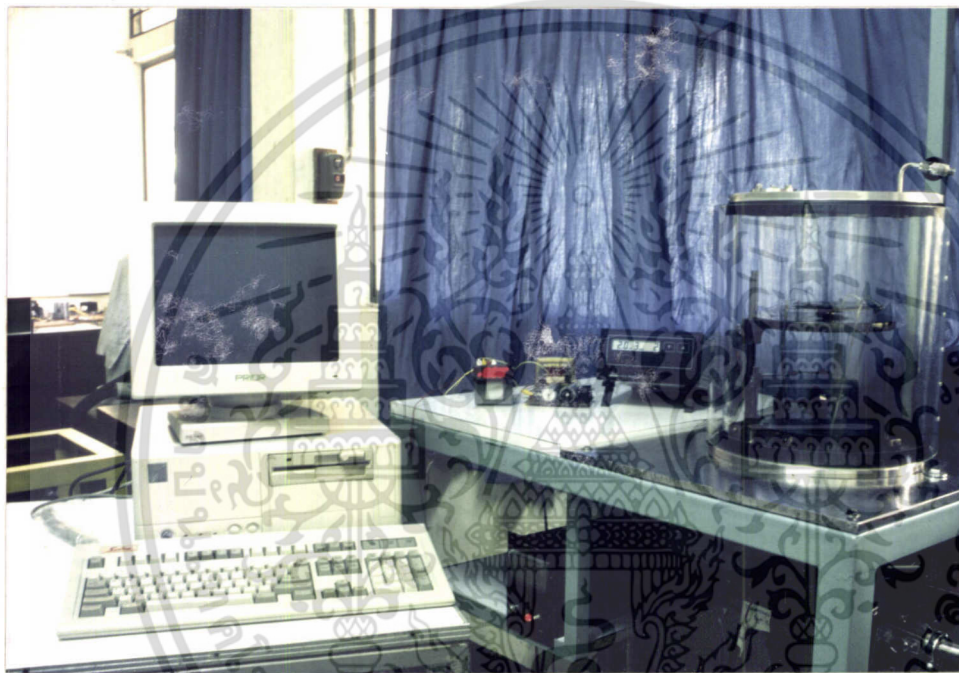
ภาคผนวก ข.

ภาพแสดงระบบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe_2



รูปที่ ผ.ข. (ก) รูปแสดงระบบระเหยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ช. (ช) รูปแสดงระบบควบคุมการระเหยสารโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของ ASTM DATA CARD

Explanation of the Data Card Format

10																
d	1a	1b	1c	1d	7					8						
I/I ₁	2a	2b	2c	2d												
Rad. Cut off Ref.	λ	I/I ₁	Filter	Dia.	d A	I/I ₁	hkl	d A	I/I ₁	hkl	9					
Sys. #0 Ref.	a ₀ b ₀ β	c ₀ y	S.G. 4	A Z	C Dx											
εα 2V Ref.	D	nωβ	mp	εγ	Color	Sign										
6																

The card shown at the left has spaces numbered from 1 to 10 inclusive. The explanation of the symbols in the various spaces is as follows:

Spaces 1a, 1b and 1c—These contain the interplanar spacings corresponding to the three strongest lines in the diffraction pattern, chosen from the forward reflections, where $2\theta < 90^\circ$. Note that the minimum d-spacing used in the classification depends upon the wavelength of the radiation used.

Space 1d—This gives the largest interplanar spacing found for the specimen.

Spaces 2a, 2b, 2c and 2d—These contain the intensities of the lines in Spaces 1a, 1b, 1c, 1d, referred to the strongest line as 100. This intensity occasionally is given a number greater than 100 when it is very much stronger than the rest of the pattern.

Space 3—Rad.—Source of the x-rays (Mo, Cu, etc.). λ —The wave length of the x-rays used in Angstroms. Filter—The substance used to filter out extraneous wave lengths. Use *mono.* for monochromator. Dia.—The diameter of the cylindrical film holder. Use *Guinier* for Guinier camera. Cut off—The longest spacing possible with the apparatus used. I/I₁—The method used to measure relative intensities. This ordinarily means either diffractometer, microphotometer, calibrated strips of photographic film or visual inspection. Ref.—Source of the data listed in Spaces 3 and 9.

Space 4—Sys.—Crystallographic system to which the specimen belongs. S.G.—The three-

dimensional space group symbol and, in parentheses, the number of the space group as given in "International Tables for X-ray Crystallography" pp 545-553 (1952). a₀ b₀ and c₀—Lattice parameters. A = a₀/b₀, C = c₀/b₀—Axial ratios, α, β, γ—Interaxial angles. Z—The number of chemical formula units per unit of structure. For chemical elements, Z represents the number of atoms per unit of structure; for compounds, Z represents the number of formula units per unit cell. Spaces 7 and 8 show usually the simplest atomic formula for the compound. The "dot" formula has been multiplied by an appropriate factor to make it agree with the formula in Space 7. Dx—Density calculated from x-ray measurements. Ref.—Source of the data listed in Space 4. V—Volume of unit cell, may be included.

Space 5—εα, nωβ, and εγ—Indices of refraction. Sign and 2V have the customary optical meanings. D—Measured density. mp—Melting point. Color—The color of the specimen as ordinarily seen or as seen when examined by microscopic methods. Occasionally other data are listed in this space, such as hardness (H) and luster of minerals. Ref.—Source of the data listed in Space 5.

Space 6—This contains further pertinent information, such as chemical analysis of the specimen, source of the sample, sublimation point

(S.P.), decomposition temperature (D.T.), transition point (T.P.), heat treatment, temperature at which the pattern was made, etc.

Space 7—Chemical formula and name of the specimen. The nomenclature follows, in general, the 1957 IUPAC *Nomenclature of Inorganic Chemistry* (J. Am. Chem. Soc. 82, 5523 (1960)). Specifically, for the names and formulas of compounds, cations are arranged in order of increasing valence (IUPAC Sect. 6.321) and, within a valence group, are arranged in alphabetical order (compare Sect. 6.322). Anions are placed in the following order: O^{2-} , single elements, multiple elements H^- , OH^- . The following rules of nomenclature will apply to set 20, subsequent sets, future revision sets and to all indexes.

1. The names for monatomic anions shall consist of the name of the element with the termination *-ide*.

H^- hydride
 D^- deuteride
 F^- fluoride
 Cl^- chloride
 Br^- bromide
 I^- iodide
 O^{2-} oxide
 S^{2-} sulfide

Se^{2-} selenide
 Te^{2-} telluride
 N^{3-} nitride
 P^{3-} phosphide
 As^{3-} arsenide
 C^4 carbide
 Si^{4-} silicide
 B^{3-} boride

2. The names of certain polyatomic anions have names ending in *-ide*.

OH^- hydroxide
 N_3^- azide
 NH_2^- imide
 NH_2^- amide
 $N_2H_3^-$ hydrazide
 CN^- cyanide
 C_2^{2-} acetylde
 CN_2^{2-} cyanamide
 O_3^- ozonide

3. No prefixes indicating proportions shall be used.

4. The suffix *-ate* will be applied to negatively charged complexes formed from B, C, N, O, F, Si, P, S, Cl, As, Se, Br, Te, I, or At with oxygen. The suffix *-ite* will be used in the following cases only.

NO_2^- nitrite
 $N_2O_2^{2-}$

PO_3^{3-}
 $P_2O_5^{4-}$ phosphite

SO_3^{2-}
 $S_2O_3^{2-}$ sulfite
 $S_2O_4^{2-}$
 $S_2O_2^{2-}$

$As_2O_3^-$ arsenite
 SeO_3^{2-} selenite

ClO_2^- chlorite—correspondingly with other
 ClO^- halogens

Prefixes indicating oxidation state (hypo, per, etc.) or water content (meta, pyro . . . , etc.) will not be used.

For polyatomic anions other than those mentioned, the central atom shall be named first then the atoms and groups attached to it. That is, the apparent positive ion shall be given its name then the attached anions; e.g., SiF_6^{2-} Silicon Fluoride. Certain anionic combination names shall be retained, SCN, thiocyanate; CNO, cyanate; CN, cyanogen; and CS_3 , thiocarbonate.

5. Certain radicals containing oxygen have special names ending in *-yl* and these shall be used as follows:

HO hydroxyl
CO carbonyl
NO nitrosyl
 NO_2 nitryl
PO phosphoryl
VO vanadyl
SO sulfinyl
 SO_2 sulfonyl
 S_2O_5 sulfuryl
SeO seleninyl
 SeO_2 selenonyl
 CrO_2 chromyl
 UO_2 uranyl
 NpO_2 neptunyl
 PuO_2 plutonyl similarly for the actinides
ClO chlorosyl
 ClO_2 chloryl and similarly for other halogens

The above mentioned polyatomic radicals always are treated as forming the positive part of the compound.

6. Acids containing more than two elements, one of which is oxygen, will be named hydrogen *-ate* subject to the rule for applying the suffix *-ate* mentioned above.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Oxonium shall be used for a hydrated proton H_3O^+ .
8. Aqua shall be used for water co-ordinately bound to a specific ion.

RULES OF ORDER

1. Alloy names are arranged in alphabetical order of the element, regardless of the order of the elements in the formulae.
2. Cations, except hydrogen, shall be arranged in order of increasing valence with polyatomic cations at the end of their appropriate valence group, except ammine or aqua which shall follow the cations with which it is associated.
3. The cations of each valence group shall be arranged alphabetically except for the polyatomic cations as described above.
4. Anions shall be arranged in the order:
 - A. O^{2-}
 - B. Other simple anions (containing one element only) alphabetically except H^-
 - C. Polyatomic inorganic anions, alphabetically
 - D. Organic, alphabetically
 - E. H^-
 - F. OH^-
 - G. Hydrate

PHASE DESIGNATION

Alloys and metallic hydrides, borides, carbides, nitrides and oxides are given formulae as described in the ASTM *Standard Method for Assigning Phase Designation in Metallic Systems* (E 157 - 77). The phase designation consists of two parts:

- (a) If the phase consists of elements in fixed stoichiometric proportions, the chemical formula is used in the first part of the designation and put in parentheses.

The chemical formula may also be used in the designation of a phase existing over a composition range provided there is no significant change in the structure; that is, the diffraction pattern remains essentially unchanged throughout the range. If the structure of the phase varies enough to produce significant changes in the diffraction pattern, (for example, if the changes in the pattern are large enough to necessitate multiple entries in the indexes to the diffraction pattern), the first part of the designation (in parentheses) must consist of the chemical symbols of the elements necessary for the formation of the phase, placed in the order of decreasing atomic percentages and separated by commas.

- (b) The second part of the designation, which is based on the crystal structure, consists

of an Arabic numeral and a capital letter. The numeral shows the number of atoms per unit cell; the capital letter indicates the type of Bravais lattice. In the printed matter, the letter should be in italics; on our typewritten card, we underscore the capital letter. The following letters are used for the various lattices:

- C*—primitive cubic
- B*—body centered cubic
- F*—face centered cubic
- T*—primitive tetragonal
- U*—centered tetragonal
- R*—rhombohedral
- H*—hexagonal
- O*—primitive orthorhombic
- P*—body centered orthorhombic
- Q*—base centered orthorhombic
- S*—face centered orthorhombic
- M*—primitive monoclinic
- N*—centered monoclinic
- Z*—triclinic

Examples: $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)5R$, $(\text{CaPt}_2)24F$, $(\text{ZrO}_2)_{12}M$, $(\text{NaZn}_{13})112F$, $(\text{Re}, \text{W})58B$.

- (c) If two phases consist of the same elements and have the same number of atoms per unit cell but different crystal structures, a lower case letter is added immediately after the numeral to distinguish between the two phases.

Example: $(\text{Se})32aM$ designates alpha selenium and $(\text{Se})32bM$ beta selenium.

- (d) An ordered phase is identified by a prime mark following the capital letter.

- (e) If the type of lattice and the number of atoms per unit cell are unknown, a temporary designation is used. The first part is the same as that for the permanent designation, but the second part is given a Greek or Latin letter. As soon as the type of lattice and number of atoms per unit cell have been determined, the temporary letter will be replaced by the permanent structure symbol. It is urged that every effort be made to avoid the creation of more than one temporary designation for the same phase. That is, subsequent authors should accept the Greek letter (or other letter) assigned by the first author to describe the phase. This can be achieved by checking the file of diffraction patterns supervised by the JCPDS International Centre for Diffraction Data.

- (f) The JCPDS has adopted the following practice regarding the temporary phase designation of compounds which it has submitted

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

also for consideration to ASTM E 157-77

1. If the type of lattice is known but the number of atoms per unit cell is unknown, a lower case *x* is placed before the lattice symbol.
2. If the type of lattice is not known but the crystal system is known, a symbol for the crystal system followed by a lower case *x* is used in place for the symbol for the space lattice, e.g. *Ox* = orthorhombic system, *Mx* = monoclinic system.
3. To avoid complications which the introduction of the phase designation symbols may cause in computer application, the whole phase designation is enclosed in square brackets. In the printout, these square brackets can be entirely suppressed.

Space 8—"Dot" or structural formula for the specimen, when available, above the mineralogical or common name, if any, of the specimen. Parentheses around the name indicates a synthetic material. A \star in the upper right corner of this space indicates that the card contains data of high reliability; an *i* indicates data which has been indexed and has estimated intensities but not as reliable as a starred card; a *c* indicates a calculated pattern; an *O* indicates low reliability, depending upon the type of pattern. The pattern of a simple structure prepared without indexing of the lines might be considered to be of low reliability, while for a complex structure accompanied by some indication of a single phase sample, lack of indexing would not warrant an *O*. This symbol is assigned by the associate editors.

Space 9—This provides columns of interplanar spacing, relative intensities and Miller indices. The relative intensities may need some explanation because the intensities published on the following data cards frequently are different from the intensities which the author used. In order to compare data from one source with another, we have written all intensities as simple numerical values

between 0 and 100. The strongest line in the pattern is 100 (unless it is so much stronger than the other lines that it is given a greater value). If the author used multiples of 5 or 10 to express his intensities, we did not change them. But if he used more precise numbers, such as 96.5, 27.1, 17.0, 10.4, 1.1, we wrote them as follows: between 100 and 20, we rounded off to the nearest multiple of 5; between 20 and 0, we rounded off to the nearest even number. If an author used letters or words to show intensities, such as *VS*, *S*, *M*, *W*, *VW*, *VVW*, we assigned numerical values, usually multiples of 10 between 0 and 100 to the letters. The values became *VS* = 100, *S* = 80, *M* = 60, *W* = 40, *VW* = 20, *VVW* = 10. Since there are more than a dozen variations of scales of letter intensities in use, the numerical scale will vary as necessary. The following abbreviations may be used in Space 9:

- b* = Broad, fuzzy or diffuse line
- d* = Doublet
- n* = Line not given by all sources
- nc* = Line not accounted for by the proposed unit cell
- ni* = Line cannot be indexed with given unit cell
- np* = Index not permitted by given space group
- β = Intensity uncertain owing to presence of, or overlapping of β lines
- tr* = Trace
- +* = Additional indices are possible.

Space 10—The location of the identification number of the card. The second card of any pattern requiring two cards is indicated with a small letter "a" following the card number.

Since the cards for Sets 28 and higher are printed back to back, the small number in the upper right hand corner of each card indicates the pattern which appears on the reverse side.

Data added by the editor are enclosed in square brackets.

4-836

d	2.09	1.81	1.28	2.09	Cu	★
I/I ₁	100	46	20	100	Copper	
						(Copper)
Rad. CuK _α	λ 1.5405	Filter Ni	Dia. 1/1	d Å	I/I ₁	hkl
Cut off	1/1	DIFFRACTOMETER	d corr. abs.?	2.088	100	111
Ref. Swanson and Tatge, JC Fel. Reports, NBS (1949)				1.808	46	200
				1.273	20	220
				1.0900	17	311
Sys. Cubic		S.G. O _h ^h -Fm3m		1.0436	5	222
a ₀ 3.6150	b ₀	c ₀	A	0.9038	3	400
α	β	γ	Z 4	0.8293	9	331
Ref. Ibid.			Dx 8.936	.8083	8	420
ε α	n ω β	ε γ	Sign			
2V	D	mp	Color			
Ref.						
Johnson and Matthey-spec. sample, annealed at 700°C in vacuum. At 26°C. To replace 1-1241, 1-1242, 2-1225, 3-1005, 3-1015, and 3-1018.						

5-0642 MINOR CORRECTION

d	2.72	2.30	1.68	2.715	IN	★
I/I ₁	100	36	24	100	INDIUM	
						(INDIUM)
Rad. CuK _α	λ 1.5405	Filter Ni	Dia. 1/1	d Å	I/I ₁	hkl
Cut off	1/1	DIFFRACTOMETER	d corr. abs.?	2.715	100	101
Ref. Swanson and Fuyat, NBS CIRCULAR 539, Vol. 1 (1957)				2.471	21	002
				2.298	36	110
				1.683	24	112
Sys. TETRAGONAL		S.G. D _{2h} ¹⁷ - I4/mmm		1.625	12	200
a ₀ 3.2517	b ₀	c ₀ 4.9459	A	1.470	16	103
α	β	γ	Z 2	1.395	23	211
Ref. Ibid.			Dx 1.321	1.358	11	202
				1.2368	3	004
ε α	n ω β	ε γ	Sign	1.1493	5	220
2V	D _h 286	mp	Color	1.0904	12	213
Ref.				1.0587	4	301
				1.0425	5	222
SAMPLE FROM FISHER SCI. CO. SPECT. ANAL.:				1.0282	8	310
<0.01% Fe, Ni, Si, Sn; <0.001% Al, Cu, Ca;				0.9845	1	204
<0.0001% Ag.				.9495	3	312
X-RAY PATTERN AT 26°C.				.9056	2	303
				.8874	4	321
				.8180	3	215
REPLACES 1-1042						

6-0362 MAJOR CORRECTION

d	3.01	3.78	2.07	3.78	(Se)3H	★
I/I ₁	100	55	35	55	SELENIUM	
						(SELENIUM)
Rad. CuK _α	λ 1.5405	Filter Ni	Dia. 1/1	d Å	I/I ₁	hkl
Cut off	1/1	DIFFRACTOMETER	d corr. abs.?	3.78	55	100
Ref. Swanson et al., NBS CIRCULAR 539 Vol. 1 (1955)				3.00	100	101
				2.184	16	110
				2.072	35	102
				1.998	20	111
Sys. HEXAGONAL		S.G. *		1.890	4	200
a ₀ 4.3662	b ₀	c ₀ 4.9538	A	1.766	20	201
α	β	γ	Z 3	1.650	10	003
Ref. Ibid.			Dx 4.809	1.637	12	112
				1.512	8	103
ε α	n ω β	ε γ	Sign	1.502	10	202
2V	D 4.80	mp 220°C	Color GRAY, REFINED	1.429	10	210
Ref. Dana's SYSTEM MINERALOGY, 7TH ED. Vol. 1				1.372	4	211
SAMPLE FROM THE HALLICKRODT CHEM. Wks.				1.317	6	113
SPECT. ANAL.:				1.244	2	203
<0.01% O, AL, Si; <0.001% B,				1.238	4	212
SA, CA, CU, FE; <0.001% Ag, Bi, Cd, Li.				1.221	4	301
X-RAY PATTERN AT 26°C.				1.176	6	104
* P3,21 (152) OR P3,21 (154)				1.125	4	302
				1.090	6	212

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23-207

d	2.07	1.13	1.20	3.38	(CuInSe ₂) _{8F} (High pressure form III)	i				
l/l ₁	100	80	70	50	Copper Indium Selenide					
Rad. CuKα λ	1.5418	Filter	Dia.		d A	l/l ₁	hkl	d A	l/l ₁	hkl
Cut off	l/l ₁ Visual				3.38	50	111			
Ref. Range et al., Z. Naturforsch., 23B 1262 (1968)					2.074	100	220			
					1.764	50	311			
					1.461	55	400			
Sys. Cubic		S.G.			1.346	30	331			
a ₀ 5.86	b ₀	c ₀	A	C	1.195	70	422			
α	β	γ	Z [2]	Dx 5.55	1.126	80	511,333			
Ref. Ibid.										
εα	nωβ	εγ	Sign							
2V	D	mp	Color							
Ref.										
Zincblende structure, formed from high pressure modification CuInSe ₂ II at 1K bar, 25°C.										

23-208

d	1.98	1.07	1.14	3.22	(CuInSe ₂) _{8F} (High pressure form II)	i				
l/l ₁	100	75	60	50	Copper Indium Selenide					
Rad. CuKα λ	1.5418	Filter	Dia.		d A	l/l ₁	hkl	d A	l/l ₁	hkl
Cut off	l/l ₁ Visual				3.22	50	111			
Ref. Range et al., Z. Naturforsch., 23B 1262 (1968)					1.976	100	220			
					1.682	45	311			
					1.394	45	400			
Sys. Cubic		S.G.			1.279	25	331			
a ₀ 5.58	b ₀	c ₀	A	C	1.140	60	422			
α	β	γ	Z [2]	Dx 6.42	1.074	75	511,333			
Ref. Ibid.										
εα	nωβ	εγ	Sign							
2V	D	mp	Color							
Ref.										
Zincblende structure, formed at approx. 40K bar, 400°C.										

23-209

d	2.04	1.74	3.34	5.20	(CuInSe ₂) _{16U}	★				
l/l ₁	100	85	70	6	Copper Indium Selenide					
Rad. CuKα λ	1.5418	Filter	Ni	Dia.	114.6mm					
Cut off	l/l ₁ Microdensitometer									
Ref. Parkes et al., Dept. of Electrical Engineering, University of Salford, England										
					5.20	6	101	0.9777	30	516,332
					3.34	70	112	.9482	2	437,507*
					3.20	6	103	.9180	15	0212
					2.52	15	211	.9140	30	620,064
Sys. Tetragonal		S.G.	142d (122)		2.15	6	105,213	.8821	20	3211
a ₀ 5.782±0.001	b ₀	c ₀	11.621±0.001	C 2.010	2.04	100	204,220	.8609	6	509,439
α	β	γ	Z [4]	Dx [5.75]	1.900	6	501	.8415	10	545,633
Ref. Ibid.					1.743	85	116,312	.8357	15	448
					1.480	6	305,323	.8255	8	529
					1.446	25	400	.8134	8	1114
εα	nωβ	εγ	Sign		1.393	4	217,411	.8115	20	5110
2V	D	mp	Color		1.327	35	316,332	.8097	30	712,552
Ref.					1.256	2	109,307			
					1.200	2	415			
					1.181	60	424			
					1.151	6	501,431			
					1.114	25	336,512			
					1.070	8	417,521			
					1.035	4	505,435			
					1.025	20	048			
Semi-conducting compound. Prepared from a stoichiometric mixture of the elements (99.9998 % Cu, 99.9999 % In and 99.9998 % Se); mixture sealed under vacuum in a quartz capsule, melted, powdered and annealed at 790°C.										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

รายละเอียดการคำนวณค่าคงที่ของแลททิซ

การคำนวณค่าคงที่ของแลททิซของสารในระบบเตตระโกนอล มีดังนี้

- วัดค่าระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก
- เปรียบเทียบระยะห่างของระนาบของผลึกกับ ASTM DATA CARD
- หาค่าที่แสดงถึงระนาบของผลึก
- หาค่าความยาวหน่วยเซลล์ของแลททิซ c

แทนค่าในสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{c^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

เมื่อ	a	เป็นค่าคงที่ของแลททิซ
	h, k, l	เป็นระนาบของผลึก
	d	เป็นค่าระยะห่างระหว่างระนาบ
	c	มีค่าเท่ากับ 11.621 Å

จากการทดลอง จะได้ค่าคงที่ของแลททิซ ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตัวอย่าง	d Å	hkl	a Å
ตัวอย่างที่ 1	3.119	103	5.259
ตัวอย่างที่ 2	3.281	112	5.622
	2.674	211	6.144
	2.117	105	5.073
		213	5.637
	2.025	220	5.728
		204	5.648
	1.732	116	5.473
		312	5.738
ตัวอย่างที่ 3	3.281	112	5.622
	2.674	211	6.144
	2.117	105	5.073
		213	5.637
	2.025	220	5.728
		204	5.648
	1.732	116	5.473
		312	5.738

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ฐิตินัย แก้วแดง "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 "
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530
- จิตติ หนูแก้ว "การเตรียมแผ่นฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์จาก 3 จุด"
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2532
- ยงชัย ชรรณดิวิฐ, นิตศัน ทองกุล "ระบบวัดและควบคุมความหนาของฟิล์มบาง
โดยไมโครคอมพิวเตอร์ (IBM PC/XT)" โครงการพิเศษ
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2533
- Kittel, C. Introduction to Solid state Physics , 5 th ed,
pp 190-210, Wiley & sons, New Delhi, 1983
- Cullity, B.D. Elements of X-Ray Diffraction , 2 nd ed.,
Addison-Wesley, Massachusetts, 1978
- Buerger, M. J. X-Ray Crystallography , 7 th printing, John
Wiley & Sons, U.S.A, 1966
- Sze, S.M. Physical of Semiconductor Devices, 2 nd ed., pp
16-32, 245-306, John Wiley & Sons., Inc., New York,
1981
- William, F.S. Principle of Materials Science and Engineering,
2nd ed, pp. 145-152, Mc Graw-Hill Publishing
Company, New York, 1990
- James, F.S. Introduction to Materials Science for Engineerings
2 nd ed., pp 108-116, Mcmillian Publishing
Company, New York, 1989
- "Alphabetical and Grouped Numerical Index of X-Ray
Diffraction Data", A.S.T.M Special Technical
Publication no.48-B, 1950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาระดับมัธยม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพัลลภา ศรีสุกใส เกิดวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ.2513 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีวิทยา แล้วเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2534

นายพรชัย จรัสสุนทรวงศ์ เกิดวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ.2513 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศนครศรีธรรมราช แล้วเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้