

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซิลิไซด์



๑คพ.
๓๑๑๗
๒๕๓๙

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

๖๑๒๕๒๖๑๕

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๓๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation and Study of Some Properties of CuInSe₂ Thin Film



Miss S.Tipawan Khalyboonme

**A Special Project in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1996**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซัลไฟด์

โดย นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. รุติณัย แก้วแดง

ผศ. งามนิตย์ แก้วแดง

ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ

ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ


ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรบัณฑิต



(รองศาสตราจารย์ สุรพล รักวิชัย)


หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



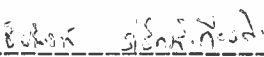
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุติณัย แก้วแดง)

ประธานกรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง)

กรรมการ



(ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ)

กรรมการ



(ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์
ชื่อนักศึกษา นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. รัฐินัย แก้วแดง
ผศ. งามนิตย์ แก้วแดง
ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ
ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้เตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 จากสถานะหลอมเหลวในแบบไดเรกชันนัล ฟริชซิง จากวิธีการลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา โดยมีผลึกโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล มีค่า $a = 5.789(7)$ อังสตรอม , $c = 11.645(6)$ อังสตรอม และ $c/a = 2.01$ แล้วนำผลึกสารกึ่งตัวนำไปใช้ในการทำฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยวิธีการระเหยสารหนึ่งจุด ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีทั้งชนิดเอ็นและพี ซึ่งเลือกใช้โลหะอินเดียมเพื่อทำเป็นรอยต่อโอห์มมิกกับฟิล์มบาง CuInSe_2 โดยทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในระบบของแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 20 นาที ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้มีค่า 1.4 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร ในชนิดพี และ มีค่า 0.9 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร ในชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Preparation and Study of Some Properties of CuInSe_2 Thin Film
Name Miss S.Tipatwan Khalyboonme
Special Project Advisor Assist. Dr. Thitinai Gaewdang
Assist. Ngamnit Gaewdang
Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat
Dr. Tiparutana Wongcharoen
Department Applied Physics
Academic Year 1996

Abstract

In this research , crystalline bulk of the semiconducting compound CuInSe_2 were prepared from the melt by directional freezing method using temperature gradient freezing 5 degree tilted-furnace techniques. The crystal structure were found to be tetragonal chalcopyrite struture with lattice $a = 5.789(7)$ Angstrom , $c = 11.645(6)$ Angstrom and $c/a = 2.01$. Then the crystalline bulk is made to be thin film which prepared by thermal evaporation from 1 source. The conductivity types are either p-type or n-type with resistivity values are 1.4 kilo ohm per area for p-type and 0.9 kilo ohm per area for n-type.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ใช้เครื่องบีบสุญญากาศที่ความดันต่ำ และขอขอบคุณ อ. ประเสริฐ พิมขาวจำ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพปฎล สุทธิศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุญาตให้ใช้ เครื่อง X-ray diffractometer ในการศึกษาโครงสร้างของ โครงผลึก

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่มีความอนุเคราะห์ให้ใช้ ระบบสุญญากาศในการเตรียมฟิล์มบาง และ อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟที่ให้กระแสสูง รวมทั้งความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ที่ท่านอาจารย์มีให้เสมอมา

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

ที่ขาดเสียมิได้ ขอขอบคุณ คุณอัมพวรรณ บัวบุตร และ คุณริติมา นาครินทร์ เพื่อนร่วม โครงการเดียวกัน ที่ช่วยกันเฝ้าเตาในขณะที่หลอมสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง กิน ระยะเวลาเกือบ 1 เดือน

ท้ายสุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจตลอดการทำ โครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	
2.1 สารกึ่งตัวนำ.....	3
2.1.1 ชนิดของผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	3
2.1.2 โครงสร้างของผลึกสารกึ่งตัวนำ.....	5
2.1.3 โครงสร้างของผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ.....	5
บทที่ 3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	
3.1 การศึกษาค่าคงที่ของ โครงผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	11
3.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึก.....	11
3.2.1 กฎของแบรกก์.....	11
3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของ โครงผลึก.....	13
3.2.3 สถานะการเลี้ยวเบนสำหรับเซลล์ 1 หน่วยที่เป็นรูปลูกบาศก์.....	13
3.3 ความเข้มสัมพันธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเนื่องจากระนาบต่าง ๆ ในผลึก.....	17
บทที่ 4 สารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์	
4.1 เฟสไดอะแกรม.....	18
4.2 ปัญหาของผลึก.....	19
4.3 การเตรียมผลึก.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การเตรียมฟิล์มบาง.....	21
4.4.1 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสาร.....	21
4.4.2 ขั้นตอนการทำฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ.....	24
บทที่ 5 การเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำจากสภาวะหลอมเหลว	
5.1 วิธีไครสตัลไลน์ ฟรังก์ซิง.....	26
5.2 วิธีของบริดจ์แมนส ไคคบาร์เกอร์.....	27
5.3 วิธีลวดอุณหภูมิ.....	27
บทที่ 6 เซลแสงอาทิตย์กับคอปเปอร์อินเดียมไดซไลไนต์	
6.1 เซลแสงอาทิตย์.....	28
6.1.1 โครงสร้างและรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
6.1.2 การเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
6.1.3 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ของรอยต่อพี-เอ็น.....	32
6.1.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
6.2 เซลแสงอาทิตย์แบบรอยต่อวิวิรพันธุ์.....	37
6.3 เซลแสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง.....	38
6.4 คุณสมบัติของ $CuInSe_2$	39
6.4.1 ความต้านทานของฟิล์มบาง $CuInSe_2$	41
6.4.2 การแอนนีสล.....	42
6.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
บทที่ 7 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	
7.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซลเดียว.....	44
7.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.1.2 การสร้างเตา.....	45
7.1.3 การประกอบเตา.....	46
7.1.4 แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ.....	47
7.2 การเตรียมผลึก.....	49
7.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก.....	50
7.2.2 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร.....	52
7.2.3 การชั่งและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์.....	52
7.2.4 ขั้นตอนในการเตรียมผลึก.....	55
7.2.5 ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ด้วย วิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา.....	55
7.3 การเตรียมฟิล์มบาง $CuInSe_2$	56
7.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม.....	56
7.3.2 ขั้นตอนในการเตรียมกระจกสไลด์.....	58
7.3.3 การระเหยสารให้เกาะติดบนกระจกสไลด์.....	58
7.3.4 การแอนนัลแผ่นฟิล์ม.....	61
7.3.5 ลักษณะของฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้ใน ระบบสุญญากาศ.....	63
7.4 ค่าคงที่ของ โคร่งผลึก.....	64
7.4.1 การเตรียมผงผลึก.....	65
7.5 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีวัดขั้วความร้อน.....	72
7.6 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์และ คำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและ โฮล.....	73
บทที่ 8 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
8.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	79
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญ(ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ.....	14
ตารางที่ 3.2 แสดงกฎการสะท้อนของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สำหรับ โครงสร้างโลหะปกติ.....	15
ตารางที่ 3.3 แสดงระนาบ {hkl} ของการเลี้ยวเบนในผลึกคิวบิก.....	16
ตารางที่ 3.4 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบการเลี้ยวเบนสำหรับแลตทิซ bcc และ fcc.....	16
ตารางที่ 7.1 แสดงน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ของ CuInSe_2	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบสำหรับสาร	
(ก) $AgIn_{(1-y)}Ga_yTe_{2(1-z)}Se_2$	
(ข) $(Cu_{(1-x)}Ag_x)(Ga_{(1-y)}In_y)(Se_{(1-z)}Te_z)_2$	4
รูปที่ 2.2 แสดงเวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้ง 3 ชนิด.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างลักษณะพื้นระ 4 หน้า.....	6
รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	7
รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์.....	8
รูปที่ 2.6 (ก) แสดง โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์	
(ข) แสดงตำแหน่งที่อยู่ของอะตอม $CuInSe_2$	10
รูปที่ 3.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึก	
ตามเงื่อนไขของแบรกก์.....	12
รูปที่ 4.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se.....	19
รูปที่ 4.2 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ.....	22
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ.....	23
รูปที่ 4.4 แสดงระบบการระเหยสารในสุญญากาศ.....	24
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของภาชนะที่ใช้ในการเตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลว.....	26
รูปที่ 6.1 แสดง โครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
รูปที่ 6.2 แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์	
(ก) แบบรอยต่อเอกพันธ์	
(ข) แบบรอยต่อวิวิธพันธ์	
(ค) แบบรอยต่อช็อคกี้ไดโอด.....	30
รูปที่ 6.3 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ได้รับแสง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.4 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง.....31

รูปที่ 6.5 แสดงโครงสร้างของรอยต่อ พี-เอ็น ในเซลล์แสงอาทิตย์.....32

รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น.....33

รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น
ขณะที่ไม่ได้รับแสงและได้รับแสง.....34

รูปที่ 6.8 (ก) แผนภาพพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะได้รับแสง
(ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์
(ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์
ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกฉายแสง
(ง) ภาพกลับหัวของรูป (ง).....36

รูปที่ 6.9 แสดงแผนภาพพลังงานของรอยต่อแบบวีวีพี.....38

รูปที่ 6.10 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS.....39

รูปที่ 6.11 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง $CuInSe_2$40

รูปที่ 6.12 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $p-CuInSe_2$41

รูปที่ 6.13 แสดงไดอะแกรมของส่วนประกอบ Cu-In-Se
ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดชนิดการนำไฟฟ้า โดยที่อัตราส่วนของ
ธาตุแต่ละธาตุนั้นมีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนสโตยคิโอมेटรี42

รูปที่ 7.1 แสดงส่วนประกอบของเตาไฟฟ้าโซลเดียวที่ใช้ในการปลูกผลึก.....46

รูปที่ 7.2 แสดงแผนภาพการต่อแหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเตา.....47

รูปที่ 7.3 แสดงการต่อวงจรของตัวควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ ดิจิคอน)
กับแหล่งจ่ายพลังงาน โดยใช้แมกนีติกรีเลย์.....48

รูปที่ 7.4 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลดลง
ของอุณหภูมิเตา.....49

รูปที่ 7.5 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาหลอมโซลเดียว
พร้อมทั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ.....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตา โดยตั้งอุณหภูมิกลางเตาไว้ที่ค่าต่าง ๆ	51
รูปที่ 7.7 แสดงชั้นตอนต่าง ๆ ในการหลอมปิดแก้วควอทซ์.....	54
รูปที่ 7.8 แสดงหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุธาตุ Cu , In และ Se.....	54
รูปที่ 7.9 แสดงขนาดของผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา.....	56
รูปที่ 7.10 แสดงระบบสุญญากาศสำหรับการเตรียมฟิล์มใน โรงงานพิเศษนี้.....	57
รูปที่ 7.11 แสดงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ (ก) แสงเข้าทางด้านขั้วไฟฟ้า (ข) แสงเข้าทางด้านกระจกใส.....	60
รูปที่ 7.12 แสดงระบบการแอนนีสที่ใช้ในการแอนนีสฟิล์มบาง.....	62
รูปที่ 7.13 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้ในการแอนนีส โดยตั้งอุณหภูมิกลางเตาไว้ที่ 200 , 300 , 400 , 500 องศาเซลเซียส.....	63
รูปที่ 7.14 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการทดลอง.....	64
รูปที่ 7.15 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง p-CuInSe_2 เมื่อมีธาตุซัลฟิดคอนเป็นตัวมาตรฐาน.....	67
รูปที่ 7.16 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง p-CuInSe_2 เมื่อไม่มีธาตุซัลฟิดคอนเป็นตัวมาตรฐาน.....	68
รูปที่ 7.17 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง n-CuInSe_2 เมื่อไม่มีธาตุซัลฟิดคอนเป็นตัวมาตรฐาน.....	69
รูปที่ 7.18 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง p-CuInSe_2	70
รูปที่ 7.19 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง n-CuInSe_2	71
รูปที่ 7.20 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ โดยวิธีวัดขั้วความร้อน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.21 (ก) แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่าง	
(ข) แสดงการเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป	
เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด.....	73
รูปที่ 7.22 แสดงกราฟการหาค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$	
ของฟิล์มบาง p-CuInSe ₂ ที่อุณหภูมิห้อง.....	75
รูปที่ 7.23 แสดงกราฟการหาค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$	
ของฟิล์มบาง n-CuInSe ₂ ที่อุณหภูมิห้อง.....	76
รูปที่ 7.24 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อ	
ระหว่างฟิล์มบาง p-CuInSe ₂ กับ In ที่อุณหภูมิ 373 และ 273 เคลวิน.....	77
รูปที่ 7.25 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อ	
ระหว่างฟิล์มบาง n-CuInSe ₂ กับ In ที่อุณหภูมิ 372 และ 273 เคลวิน.....	78

บทที่ 1

บทนำ

ในภาวะปัจจุบัน ความต้องการพลังงานที่สะอาดไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีมากขึ้น ความพยายามในการค้นหาแหล่งกำเนิดพลังงานใหม่ ๆ ก็มีมากขึ้นทุกขณะ แหล่งกำเนิดพลังงานแหล่งใหม่ที่ถูกมองและให้ความสนใจมาก คือ ตัวกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic electric generators) ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำชนิดกอนทั้งในรูปผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) และ อะมอร์ฟัส (amorphous) ได้ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงการค้า นอกจากนี้ยังมีสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ อีกด้วย เช่น GaAs , CdTe , CdS เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง CuInSe_2 ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ผลิตขึ้นจาก CuInSe_2 ในรูปของรอยต่ออวิวิพันธ์ $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 10% โดยทั่วไปผลึกเดี่ยวชนิดที่เป็นก้อนผลึก (bulk) ของ CuInSe_2 จะเตรียมขึ้นจากการหลอมของสารตั้งต้นโดยตรง (solidification technique) [1,2] ส่วนฟิล์มบางของ CuInSe_2 สามารถเตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีการสปัตเตอร์ด้วยคลื่นวิทยุ (r.f. sputtering) [3] วิธีการฉีดสเปรย์ (spray pyrolysis) [4] วิธีการระเหยสารตั้งต้นด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam sputtering) [5] และวิธีการระเหยด้วยความร้อนภายใต้ระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) [6,7] ซึ่งวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนจากแหล่งกำเนิด 3 แหล่ง (three-source evaporation) [7] พบว่าให้ผลดีมากเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตด้วยวิธีนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 10% [8]

ฟิล์มบางของ CuInSe_2 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่สำคัญ CuInSe_2 มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมากกว่า 10^5 ต่อตารางเซนติเมตร (cm^{-1}) [9] ซึ่งมีค่าสูงมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่สามารถพบได้ในทุกวันนี้

ในงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาถึงการสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก CuInSe_2 ด้วยวิธีไดเรกชันนัล ฟรีซซิง (directional freezing) พร้อมทั้งยังทำฟิล์มบาง CuInSe_2 และศึกษาถึงสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ นอกจากนี้แล้วยังนำฟิล์ม CuInSe_2 มาทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย สำหรับขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

1. สร้างเตาไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ เพื่อใช้ในการหลอม และ แอนนิลสาร พร้อมทั้งทำการสร้างอุปกรณ์กึ่งกลางศาสตร์ที่ต่อพ่วงเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้แก่เตาโดยอัตโนมัติ
2. นำธาตุ Cu , In และ Se ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาหลอมเพื่อให้ได้ผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 โดยใช้เตาไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ในแนวเฉียง 5 องศา
3. นำผลึกสารกึ่งตัวนำของ CuInSe_2 ที่เตรียมได้มาวัดหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X - ray diffraction)
4. นำผลึกสารกึ่งตัวนำของ CuInSe_2 มาทำการบดให้เป็นก้อนเล็ก ๆ เพื่อนำไปทำฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ
5. ทำการตรวจสอบรอยต่อโอห์มมิก
6. ทำการทดสอบชนิดการนำไฟฟ้าของทั้งก้อนผลึกสารกึ่งตัวนำและฟิล์มบาง
7. ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์
8. ทำการสร้างรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ (Heterojunction) ของ $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ทำการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
9. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

2.1 สารกึ่งตัวนำ [10,11]

เราสามารถแบ่งประเภทของสารต่าง ๆ ออกเป็น 3 ประเภท ตามความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิห้องสารโดยทั่วไปจะมีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) อยู่ในช่วง $10^6 - 10^{12}$ โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega\text{-cm}$) จากสมบัติดังกล่าวสามารถที่จะจำแนกประเภทของสารได้ดังนี้ คือ โลหะซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี สารกึ่งตัวนำ และฉนวนซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดี โดยเฉพาะสารกึ่งตัวนำมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า อยู่ในช่วง $10^3 - 10^6$ โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega\text{-cm}$) และมีคุณสมบัติต่างจากสารประเภทอื่น คือ

1. มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามอุณหภูมิเป็นลบ
2. มีสมบัติเกี่ยวกับการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสตรง
3. สามารถตอบสนองต่อแสง กล่าวคือ เมื่อมีแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น และความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้
4. ให้กำลังทางไฟฟ้าเนื่องจากมีความร้อนสูง
5. สามารถได้ป้อนได้ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป

2.1.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ [10]

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างคล้ายเพชร สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้มีโครงสร้างผลึกที่คล้ายกัน เกิดจากการจับกันของอะตอมซึ่งเป็นพันธะ 4 หน้า (Tetrahedral bond) ผลึกสารกึ่งตัวนำอาจจะประกอบไปด้วยธาตุเดียว หรือ เป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุหลายชนิดก็ได้ อาจแยกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.1.1.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำของธาตุเดี่ยว

ธาตุสารกึ่งตัวนำประเภทนี้คือธาตุในกลุ่ม IV ของตารางธาตุโดยเฉพาะ Si และ Ge ให้นำไปทำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกันอย่างแพร่หลาย สำหรับเพชรซึ่งเป็นอัญมณีของคาร์บอนในกลุ่มเดียวกันนี้ถูกจัดให้เป็นฉนวนเนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ากว้างมากถึง 5.0 อิเล็กตรอน โวลต์

2.1.1.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่ (binary compound)

ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ที่สำคัญแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

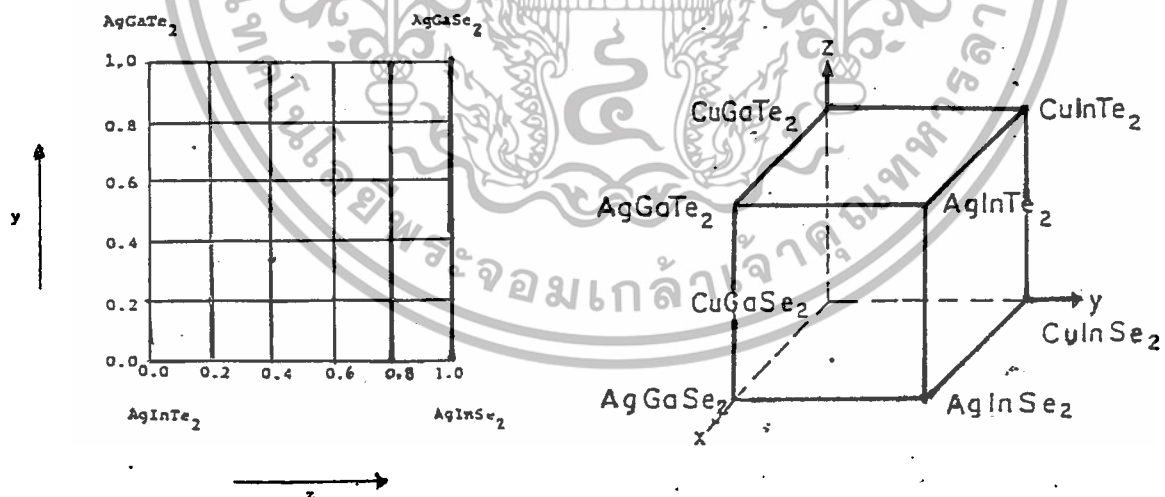
2.1.1.2.1 กลุ่ม II-VI เป็นสารประกอบสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการรวมกันของธาตุกลุ่ม II ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว กับธาตุกลุ่ม VI มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 6 ตัว ได้แก่ ZnS , ZnSe , CdSe , ZnTe , CdTe

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

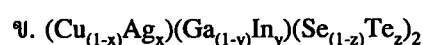
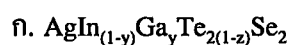
2.1.1.3 ผลึกสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงสาม (ternary compounds)

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

2.1.1.3.2 กลุ่ม II-IV-V₂ ได้จากการนำสารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่ม 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 คือ Si , Ge , Sn กลุ่ม V คือ P , As , Sb เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงสัดส่วนขององค์ประกอบสาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.4 โลหะผสมสารกึ่งตัวนำ

ผลึกของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดที่เป็นธาตุ และสารประกอบสามารถเตรียมขึ้นโดยนำเอาธาตุในกลุ่มเดียวกัน 2 ธาตุมาแทนที่กัน ในลักษณะของโลหะผสม โดยมีสัดส่วนของอะตอมต่าง ๆ กัน ทำให้ได้ชนิดของสารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้จำนวนไม่จำกัด แต่ละชนิดจะมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกัน บางชนิดก็ได้รับการพัฒนาเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างโลหะผสมของสารกึ่งตัวนำที่จำแนกตามชนิดของสารเริ่มต้นได้ดังนี้

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

2.1.2 โครงสร้างของผลึกสาร [12,13]

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอม หรือ โมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะระหว่างอะตอมมีค่าคงที่ และ มีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระบบต่อเนื่องไป ภายในหนึ่งหน่วยของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมบางธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลาย ๆ อะตอมหรือหลาย ๆ โมเลกุล กลุ่มของอะตอมหรือโมเลกุลที่เล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และ เรียกบริเวณช่องว่างที่มีขนาดเท่ากับหน่วยเซลล์นี้ว่า แลททิซ (lattice).

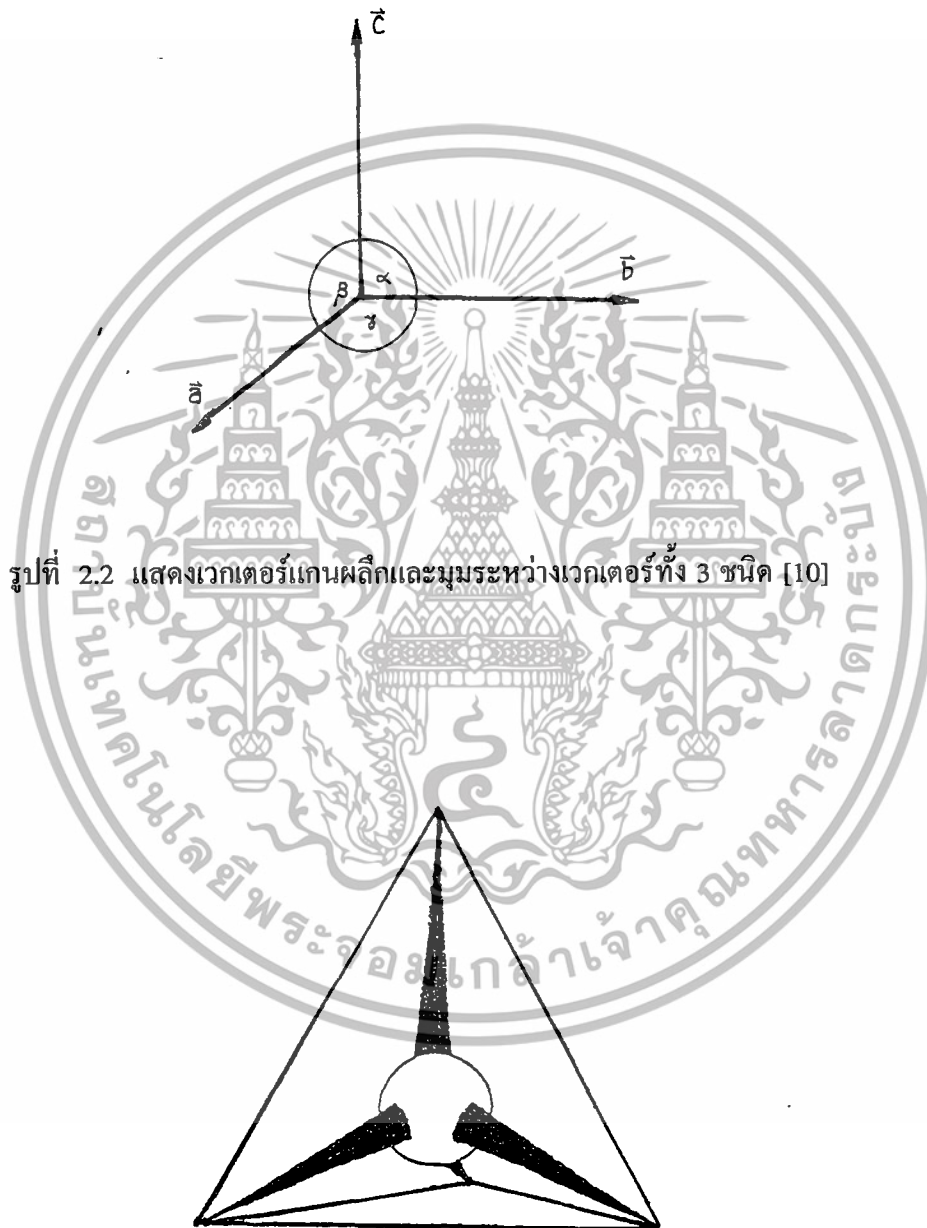
ได้มีการจัดแบ่งรูปแบบแลททิซขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบ ซึ่งจัดเป็นกลุ่มได้ 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออโรโรมบิก (orthorombic) และ เฮกซะโกนอล (hexagonal) โดยการแบ่งชนิดของแลททิซนี้ใช้เวกเตอร์แกนผลึก (crystal axis vector) a , b และ c กับ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์แกนผลึกเป็นตัวกำหนดลักษณะของแลททิซแต่ละชนิด เวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างทิศของเวกเตอร์แกนผลึกมีลักษณะดังรูป 2.2

2.1.3 โครงสร้างของผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ [10,11]

โครงสร้างแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับ ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้น ๆ ที่เราเรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้มีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายกับโครงสร้างผลึกของเพชร ซึ่งเกิดจากการจับกันของธาตุที่มีพันธะ 4 หน้า ดังรูปที่ 2.3



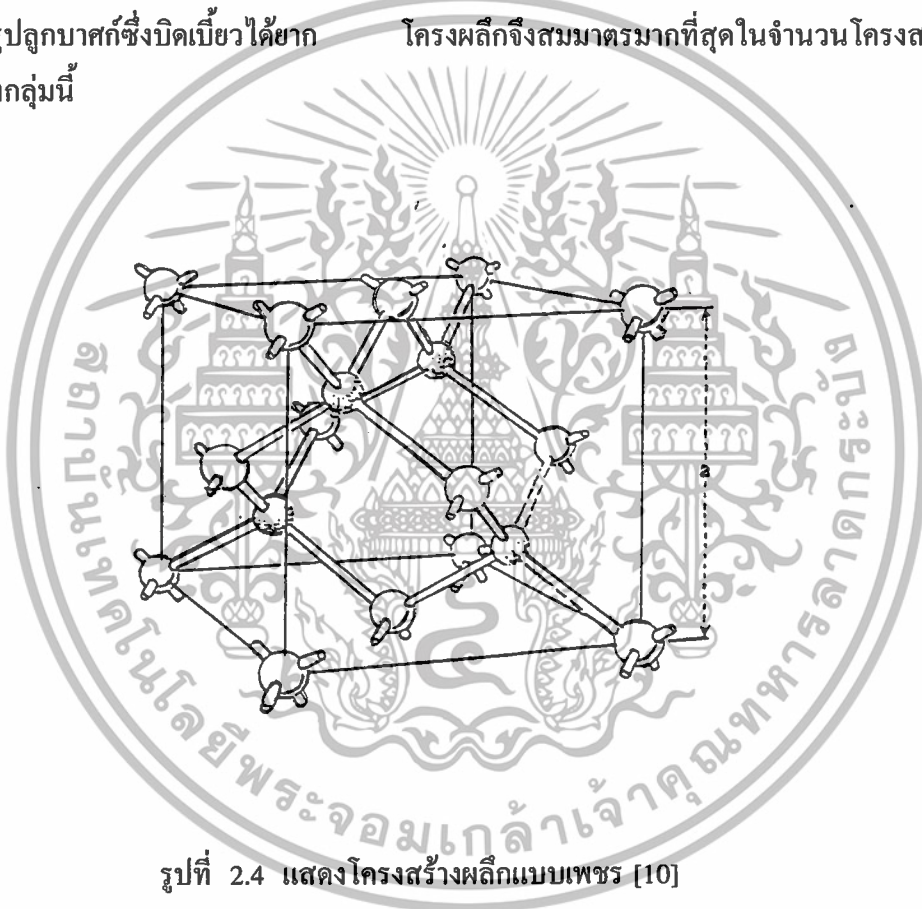
รูปที่ 2.2 แสดงเวกเตอร์แกนผลึกและมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้ง 3 ชนิด [10]

รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างลักษณะพันธะ 4 หน้า [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 โครงสร้างแบบเพชร (diamond structure) [10]

โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ C , Si , Ge และ α - Sn อาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างนี้เกิดจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบ fcc (face-centered cubic lattice , $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) 2 โครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $1/4$ ของเส้นทแยงมุมโดยหนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอม และอะตอมของโครงสร้างทั้งสองเป็นชนิดเดียวกัน อยู่ที่ตำแหน่ง 000 , $0\ 1/2\ 1/2$, $1/2\ 0\ 1/2$, $1/2\ 1/2\ 0$, $1/4\ 1/4\ 1/4$, $1/4\ 3/4\ 3/4$, $3/4\ 1/4\ 3/4$, $3/4\ 3/4\ 1/4$ แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงสร้างแบบนี้เป็นรูปลูกบาศก์ซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงสร้างผลึกจึงสมมาตรมากที่สุดในจำนวนโครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร [10]

2.1.3.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure) [10]

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe และ ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้าง

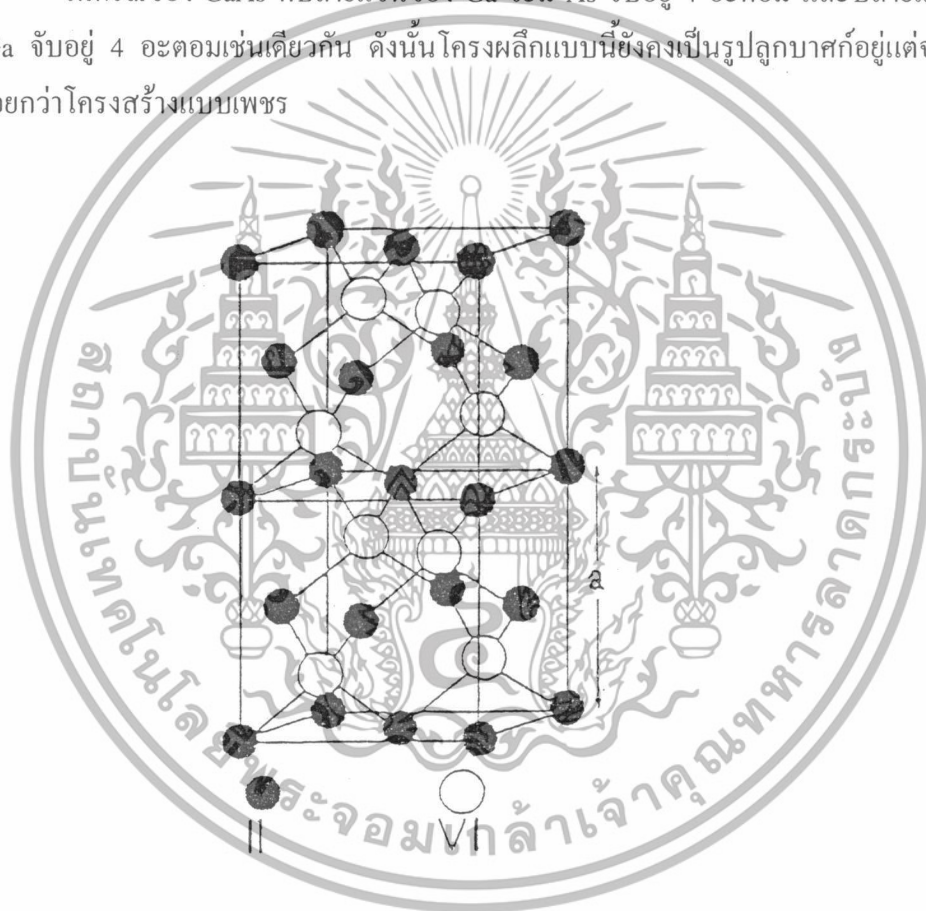
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกแบบ เฟส เซนเตอร์ คิวบิก (face-centered cubic) 2 โครงสร้างซ้อนกันอยู่แต่โครงสร้างหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงสร้างเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-IV (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs โดยที่

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 ดังนั้นโครงสร้างแบบนี้ยังคงเป็นรูปลูกบาศก์อยู่แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างแบบเพชร



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ [10]

2.1.3.3 โครงสร้างแบบซัลโคไพไรต์ (chalcopyrite structure) [10]

โครงสร้างผลึกแบบนี้พบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยธาตุ 3 ชนิดที่เรียกว่า สารประกอบสารกึ่งตัวนำเชิงสาม ซึ่งได้แก่สารในกลุ่ม I-III-VI₂ เช่น AgGaTe₂ และ CuInSe₂ เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (ชนิดกลุ่ม II-VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ III-V ตามลำดับ) เราอาจพิจารณาว่าเป็นการเพิ่มองค์ประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ในกลุ่ม II-VI เป็น 2 เท่า แล้วแทนที่ธาตุหมู่ II ด้วยธาตุหมู่ I และ III ตามลำดับ ตามรูปที่ 2.6 โดยการขยายหน่วยเซลล์ของซิงค์เบลนด์ออกเป็น 2 เท่าตามแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์จึงเป็น 2 เท่าของซิงค์เบลนด์ และ มี 16 อะตอม ตัวอย่างเช่น สารประกอบสารกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI₂ ในโครงผลึกแบบ fcc อันหนึ่งประกอบด้วย อะตอมของธาตุในกลุ่ม I และ III เรียงสลับกันตามแนวแกน c และ โครงสร้างผลึกอีกอันหนึ่งมีเฉพาะอะตอมของธาตุกลุ่ม VI เรียงอยู่ในหนึ่งหน่วยเซลล์ จำนวนและตำแหน่งอะตอมของธาตุต่าง ๆ มีดังนี้ คือ

ธาตุกลุ่ม I มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 000 , $0\ 1/2\ 3/4$, $1/2\ 1/2\ 1/2$, $1/2\ 0\ 1/4$

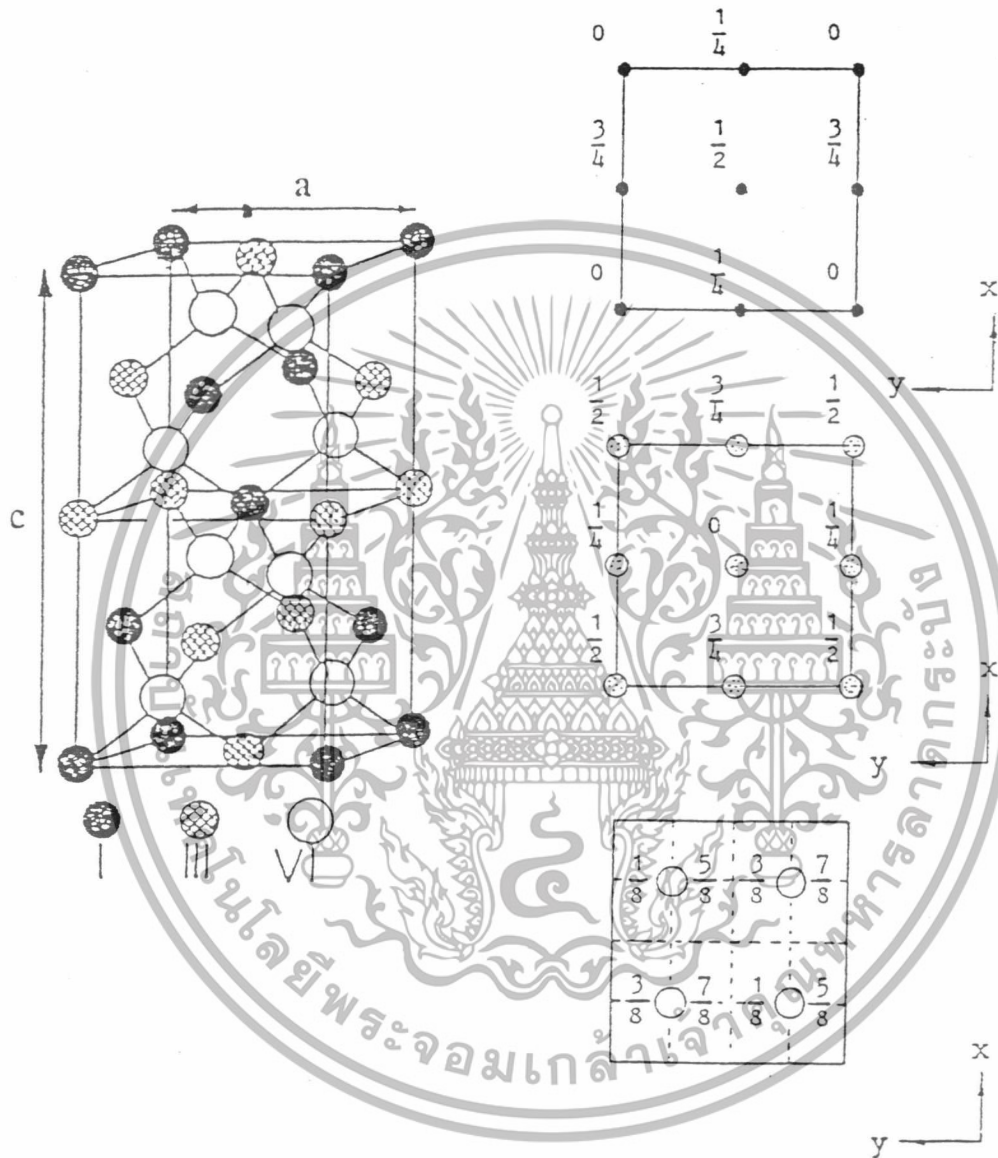
ธาตุกลุ่ม III มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง $001/2$, $0\ 1/2\ 1/4$, $1/2\ 1/2\ 0$, $1/2\ 0\ 3/4$

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 คือการเลื่อนของแอนไอออน (anion displacement) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อะตอมของธาตุกลุ่ม VI จับกับอะตอมของธาตุกลุ่ม I และ กลุ่ม III อย่างละ 2 อะตอม จึงทำให้เกิดความยาวของพันธะ (bond length) ไม่เท่ากัน

ตามหลักการดังกล่าว ความยาวของแกน c ควรเป็น 2 เท่าของความยาวของแกน a หรือ $c/a = 2$ แต่ในความเป็นจริงเนื่องจากโครงสร้างผลึกนี้ประกอบด้วยอะตอมของสารที่แตกต่างกันถึง 3 ชนิด ทำให้มีพันธะอยู่ 2 ชนิดซึ่งมีขนาดของพันธะเท่ากัน ได้แก่ ชนิด I - IV และ ชนิด III - VI ในการจับตัวแบบพันธะ 4 หน้า เป็นผลให้อะตอมชนิด VI เลื่อนไปจากตำแหน่ง $(1/4, 1/4, 1/4)$ ในโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ไปที่ตำแหน่ง $(U, 1/4, 1/8)$ ของโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์ โดยที่ U อาจมากกว่าหรือน้อยกว่า $1/4$ ขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ เรียกว่า พารามิเตอร์ U (U - parameter) นอกจากนั้นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกน c และขนานกับแกน c ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการหดหรือขยายตัวของผลึกในแกน c ทำให้ค่า c/a ไม่เท่ากับ 2 เรียกว่า การบิดเบี้ยวของเททระโกนอล (tetragonal distortion) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการแยกออก (split) ของระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์ในโครงสร้างชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 (ก) แสดงโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์

(ข) แสดงตำแหน่งอะตอมของผลึก CuInSe₂ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.1 การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในการศึกษาสารกึ่งตัวนำนั้น เริ่มต้นจากการเตรียมผลึกจะด้วยวิธีใดก็ตาม เพื่อให้ได้ผลึกสารตัวอย่างขึ้นมา แล้วก่อนที่จะมีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ใด ๆ ต่อไป จะต้องผ่านขั้นตอนที่สำคัญที่สุด คือ การตรวจสอบหรือการศึกษาโครงสร้างของสารที่เตรียมได้โดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (x - ray diffraction) เพื่อเป็นการยืนยันว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของผลึก ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาค่าคงที่ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้น

3.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากผลึก [10,11,12]

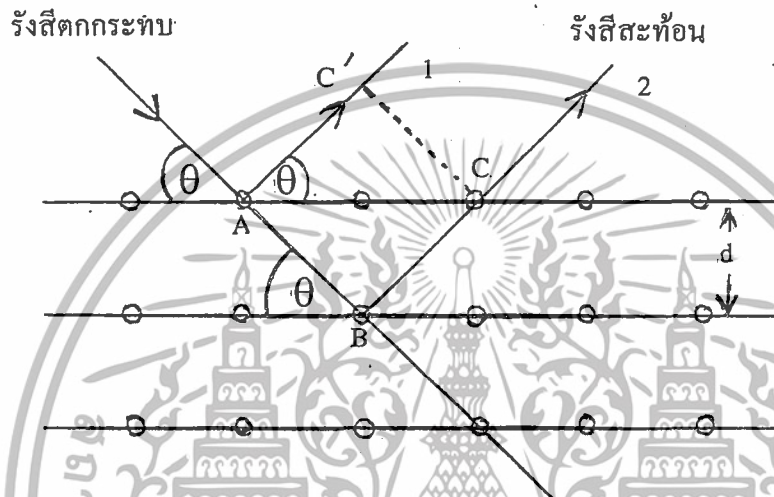
การเลี้ยวเบนเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก โดยความยาวคลื่นที่ใช้ศึกษาการเลี้ยวเบนจากผลึกนั้นจะต้องมีค่าพอ ๆ กับระยะห่างของอะตอมภายในผลึก คือประมาณ 1 อังสตรอม คลื่นที่ใช้ในการศึกษาการเลี้ยวเบนมีอยู่ 3 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ รังสีแคโทดหรืออิเล็กตรอน และ นิวตรอน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น

ในปี พ.ศ. 2438 Roentgen เป็นผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์ซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านตัวกลางได้ดี ช่วงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เหมาะสมสำหรับหาโครงผลึกควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 - 3 อังสตรอม เมื่อรังสีตกกระทบผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนเพราะอิเล็กตรอนของอะตอมในผลึกสั่น เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้พลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ค่าเดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ หรือ กล่าวได้ว่า อิเล็กตรอนในอะตอมจะทำหน้าที่เสมือนเป็นต้นกำเนิดรังสีเอ็กซ์ความถี่เดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านเข้ามาในอะตอม

3.2.1 กฎของแบรกก์ (Bragg Law) [10]

เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอม ซึ่งจัดเรียงตัวกันอยู่บนระนาบของโครงผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น เมื่อมุมตกกระทบ ความยาวคลื่น และ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมใน

ผลึกมีค่าที่เหมาะสม อะตอมเหล่านี้จะกระเจิงรังสีเอ็กซ์ทำให้ดูเหมือนกับว่า รังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนระนาบแล้วเกิดการสะท้อน โดยที่ระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d ให้รังสีเอ็กซ์ ตกกระทบระนาบที่จุด A และ B เป็นมุม θ แล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ เท่าเดิม มุม θ นี้เรียกว่า มุมของแบรกก์ (Bragg angle) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์ [10]

พิจารณารูปที่ 3.1 จะเห็นว่าคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อทางเดินของคลื่นทั้งสองมีค่าต่างกันเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ให้ Δ เป็นทางเดินที่ต่างกันของคลื่นสะท้อนที่ 1 และ 2 ดังนั้น สามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta = n\lambda ; n = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

จากรูปที่ 3.1

$$\begin{aligned} \Delta &= AB + BC - AC \\ &= 2AB - AC \\ \text{เมื่อ} \quad AB &= d / \sin \theta \\ \text{และ} \quad AC &= AC \cos \theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AC = (2d / \tan \theta) \cos \theta \quad (3.3)$$

แทนค่าสมการที่ (3.2) และ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.4)$$

สมการที่ (3.4) นี้เรียกว่า กฎของแบรกก์ (The Bragg Law) เป็นสมการที่สามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ผ่านฟิล์มบางได้

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก [11]

จากความรู้ทางผลึกวิทยา (Crystallography) ซึ่งพิจารณาได้ว่าผลึกประกอบด้วยระนาบชุดต่าง ๆ 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 system) แบบต่าง ๆ ปรากฏดังตารางที่ 3.1

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

$$1 / d_{hkl}^2 = ((h^2 + k^2) / a^2) + (l^2 / c^2) \quad (3.5)$$

ถ้าเรารวมสมการที่ (3.4) เมื่อ $n = 1$ กับสมการที่ (3.5) แล้วก็จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a , c) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (h , k , l) ดังสมการ

$$4 \sin^2 \theta / \lambda^2 = ((h^2 + k^2) / a^2) + (l^2 / c^2) \quad (3.6)$$

3.2.3 สถานะการเลี้ยวเบนสำหรับเซลล์หนึ่งหน่วยที่เป็นรูปลูกบาศก์ [10]

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สามารถใช้วัดหา โครงสร้างของพหุผลึกของแข็ง การแปลความหมายของข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ส่วนใหญ่มีความซับซ้อน การวิเคราะห์ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สำหรับเซลล์หนึ่งหน่วยรูปลูกบาศก์ สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กับสมการแบรกก์

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.7)$$

สมการนี้สามารถใช้กับข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในกรณีที่โครงสร้างผลึกลูกบาศก์ เป็น บอดี เซ็นเตอร์ คิวบิก (body - centered cubic) หรือ เฟส เซ็นเตอร์ คิวบิก (face - centered cubic)

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบ [10]

โครงสร้างของผลึก	ส่วนกลับกำลังสองของระยะห่างระหว่างระนาบ
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 :	$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{v^2} (s_{11}h^2 + s_{22}k^2 + s_{33}l^2 + 2s_{12}hk + 2s_{23}kl + 2s_{13}hl)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการของผลึกไตรคลินิก (triclinic crystals)

V = ปริมาตรของหน่วยเซลล์

$$S_{11} = b^2 c \sin^2 \alpha$$

$$S_{22} = a^2 c \sin^2 \beta$$

$$S_{33} = a^2 b \sin^2 \gamma$$

$$S_{12} = abc^2 (\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)$$

$$S_{23} = a^2 bc (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha)$$

$$S_{13} = ab^2 c (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงกฎการสะท้อนของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับโครงสร้างโลหะปกติ [10]

รูปแบบของแลตทิส	การสะท้อนเกิดเมื่อ	การสะท้อนไม่เกิดเมื่อ
bcc	$(h + k + l)$ เป็น เลขคู่	$(h + k + l)$ เป็น เลขคี่
fcc	$(h + k + l)$ เป็นทั้งเลขคู่และคี่	

จากสมการที่ (3.7) สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบน ซึ่งเราทราบระนาบผลึกที่เป็นระนาบเลี้ยวเบนสำหรับแต่ละแบบของโครงสร้างผลึก สำหรับการสะท้อนจากทุกระนาบ (hkl) เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้าง bcc การเลี้ยวเบนเกิดเฉพาะระนาบซึ่งเป็นดัชนีมิลเลอร์เมื่อเพิ่มผลรวม $(h + k + l)$ เข้าด้วยกันกับจำนวนคู่ (ตารางที่ 3.3) ดังนั้นสำหรับโครงสร้างแบบ bcc ระนาบการเลี้ยวเบนพื้นฐานเป็น $\{110\}$, $\{200\}$, $\{211\}$ เป็นต้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4 ในกรณีโครงสร้างผลึก fcc ระนาบการเลี้ยวเบนพื้นฐานของดัชนีมิลเลอร์ เป็นทั้งกรณีคู่ และ คี่ (0 พิจารณาเป็นคู่) ดังนั้นสำหรับโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบเลี้ยวเบนเป็น $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ เป็นต้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงระนาบ {hkl} ของการเลี้ยวเบนในผลึกคิวบิก [10]

โครงสร้างผลึก	การเลี้ยวเบนไม่เกิดขึ้น เมื่อ	การเลี้ยวเบนเกิดขึ้น เมื่อ
bcc (body - centered cubic)	$(h + k + l)$ เป็น เลขคี่	$(h + k + l)$ เป็น เลขคู่
fcc (face - centered cubic)	-	เกิดทุกกรณี
hcp (hexagonal closed packed)	$(h + 2k) = 3n, l$ เป็น เลขคี่ (n เป็น เลขจำนวนเต็ม)	ทุกกรณียกเว้นกรณีที่ การเลี้ยวเบน

ตาราง 3.4 ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบเลี้ยวเบนสำหรับเลขที่ขแบบ bcc และ fcc [10]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเนื่องจากระนาบต่าง ๆ ในผลึก [11]

การศึกษาความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน (the relative intensities of the diffraction lines , I) เนื่องจากระนาบต่าง ๆ ในผลึกจะเป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงชนิดของโครงสร้างผลึก และ รายละเอียดภายในหน่วยเซลล์ (unit cell) ตำแหน่งและชนิดของอะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในหน่วยเซลล์มีอิทธิพลต่อความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน และ ทิศทางการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกกระเจิงด้วยอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจนถึงอะตอมหนึ่งอะตอม และ อะตอมต่าง ๆ ภายในหน่วยเซลล์ ตามลำดับ พบว่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเป็นไปตามความสัมพันธ์ [11]

$$I \propto |F|^2 pL \tag{3.8}$$

เมื่อแฟกเตอร์พหุคูณ (multiplicity factor , p) คือ จำนวนของระนาบเลี้ยวเบนที่ต่างกัน แต่เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมแบรกก์ (θ) ค่าเดียวกัน ค่าแฟกเตอร์พหุคูณนี้ ขึ้นอยู่กับสมมาตรของผลึก (crystal symmetry) และดัชนีมิลเลอร์ของระนาบสะท้อน

แฟกเตอร์ลอเรนตซ์ - โพรราไรเซชัน (L) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมของแบรกก์ (θ) ดังสมการที่ 3.9

$$L = \left(\frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right) \tag{3.9}$$

แฟกเตอร์โครงสร้าง (F) คือ คลื่นลัพธ์ของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกกระเจิงออกมาจากอะตอมทั้งหมดของหน่วยเซลล์ของผลึก ความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์โครงสร้างกับค่าต่าง ๆ ดังกล่าวจึงเขียนได้ดังนี้

$$F = \sum_n^N f_n e^{2\pi i(hx_n + ky_n + lz_n)} \tag{3.10}$$

เมื่อ

- f_n คือ แฟกเตอร์การกระเจิงของอะตอมตัวที่ n
- $(x_n , y_n$ และ $z_n)$ คือ ตำแหน่งของอะตอมตัวที่ n
- N คือ จำนวนอะตอมทั้งหมดในหน่วยเซลล์

บทที่ 4

สารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนต์

ผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 เตรียมเป็นครั้งแรกโดย Hahn และผู้ร่วมงาน [8,11] ในระยะเริ่มต้นการศึกษาสารกึ่งตัวนำกลุ่มซัลโคไฟไรท์ได้รับความสนใจในแง่สมบัติพิเศษซึ่งแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่รู้จักกันในขณะนั้น กล่าวคือ สารกึ่งตัวนำกลุ่มซัลโคไฟไรท์นี้มีโครงสร้างเป็นแบบทรงแทงอนอล ส่วนสารกึ่งตัวนำตัวอื่น ๆ มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (cubic system) จึงทำให้สมบัติเชิงแสง (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีสมบัติพิเศษ คือ ปรากฏการณ์ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringent) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนความถี่แสงได้ ส่วนสมบัติอื่น ๆ ก็ได้รับความสนใจในแนวทางเดียวกับสารกึ่งตัวนำตัวอื่น ๆ ต่อมาเมื่อเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันโลกจึงได้มีความสนใจที่จะนำสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

4.1 เฟสไดอะแกรม (phase diagram) [8,11,14]

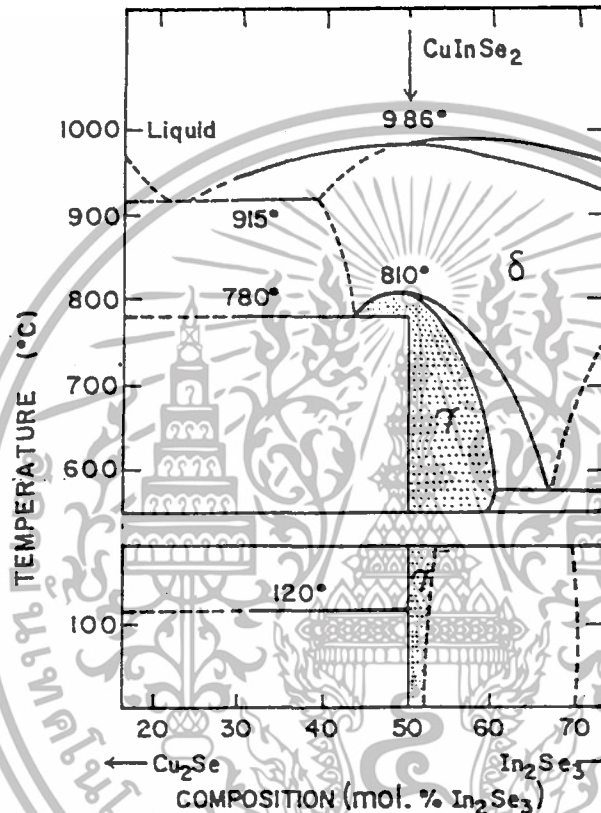
เป็นที่ทราบกันดีว่าลักษณะของ CuInSe_2 ที่ทำการสร้างขึ้นโดยการระเหย หรือด้วยเทคนิคอื่น ๆ นั้น สารประกอบที่เตรียมได้ส่วนใหญ่เป็นการสังเคราะห์ขึ้นโดยตรงระหว่างธาตุ Cu , In และ Se ด้วยสัดส่วนอะตอม 1 : 1 : 2 จากการศึกษาสารประกอบพบว่าสัดส่วนดังกล่าวซึ่งเรียกวาสตอยคิโอมेटรี (stoichiometry) หรืออยู่ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงนั้น สารประกอบที่เตรียมได้จะมีขนาดเกรนที่ใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนอื่น ๆ และอาจมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อนำมาทำเป็นอุปกรณ์

สัดส่วนเฉลี่ยของสารประกอบ Cu - In - Se เป็นสัดส่วนของสารประกอบ Cu_2Se และ In_2Se_3 ที่ต่อเชื่อมกันไปตามแกนแนวนอนดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงด้วยเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม (pseudo - binary phasediagram) [8] สารประกอบที่มีอยู่ในระบบ Cu - In - Se มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน โดยสารประกอบที่มีอยู่ใน $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$ pseudobinary ด้วยได้แก่ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$, $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{Se}_9$, CuIn_3Se_5 , Cu_5InSe_4 และ CuIn_5Se_8

จากรูปที่ 4.1 : จุดหลอมเหลวของ CuInSe_2 อยู่ในช่วง 986 - 990 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิในช่วงนี้ และ ต่ำกว่านี้ CuInSe_2 มีโครงสร้างแบบซิงเบลนด์ (δ - phase) ที่ 810 องศาเซลเซียส โครงสร้างจะเปลี่ยนจากซิงเบลนด์ไปเป็นซัลโคไฟไรท์ (γ - phase) โดยที่มีหน่วยเซลล์ (unit cell) เป็นแบบทรงแทงอนอล (tetragonal) ซึ่งมีค่าคงที่แลตทิซ (lattice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

constant) $a = 5.782$ อังสตรอม และ $c = 11.620$ อังสตรอม ได้มีการศึกษากันแล้วว่าการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่ำกว่า 810 องศาเซลเซียส มีอยู่ 2 กรณีด้วยกัน : กรณีแรกที่ 790 องศาเซลเซียส อีกกรณีหนึ่ง คือ 665 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 2 กรณีนั้นยังไม่เป็นที่ยืนยันแน่ชัด



รูปที่ 4.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se [8]

4.2 ปัญหาของผลึก [14]

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเตรียมผลึกจากการหลอมละลาย (melt) ที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากพอสรุปได้ดังนี้

1. รอยแยกขนาดเล็ก (microcracking) และรอยแยกขนาดใหญ่ (bulk cracking) ซึ่งโดยทั่วไปจะพบเมื่อเราทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
2. ระนาบซ้อนในทิศทางต่างกัน (Twinning) เกิดขึ้นได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับข้อ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารประกอบ CuInSe_2 ที่เตรียมได้อาจจะติดกับผนังของหลอดแก้วที่บรรจุสาร ซึ่งอาจจะทำให้หลอดแก้วที่บรรจุสารแตกได้เมื่ออุณหภูมิลดลง
4. ช่องว่าง (voids) สามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างการปลูกผลึก ในบางครั้งเกิดขึ้นในเนื้อสาร แต่ส่วนมากช่องว่างนี้จะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารประกอบกับด้านในของหลอดแก้ว
5. ปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ระหว่างในการให้ความร้อน กับ In และ Se นั้นอาจจะเกิดความดันขึ้นภายในหลอดอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการระเบิดของหลอดได้

ในการเตรียมผลึกโดยวิธีการหลอมนั้น เราต้องทำการหลอมสารภายในภาชนะที่มีการปิดสนิท และ ภาชนะที่นำมาใช้นั้นจะต้องไม่ทำให้เนื้อสารนั้นติดแน่น ซึ่งในการหลอม CuInSe_2 ถ้าใช้ ไพโรไลติก โบรอน ไนไตรด์ (pyrolytic boron nitride) แล้ว CuInSe_2 จะไม่หลอมติดกับแก้วหลอม ส่วนผลึกที่เตรียมโดยใช้ภาชนะอุณหภูมิพบว่าผลึกมีรอยแยกทั้งเล็กและใหญ่ หรืออาจจะเกิดผลึกแฝดด้วย (twin) ในการป้องกันการติดแน่นของสารบริเวณผิวของภาชนะทำได้โดยก่อนที่จะนำหลอดมาใช้จะต้องล้างให้สะอาดด้วยสารละลายเคมี และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลาย ๆ ชั่วโมง

4.3 การเตรียมผลึก [14]

ในการเตรียมผลึกด้วยวิธีไดเรกชันัล ฟรีซซิง (directional freezing technique) เราพบว่าบ่อยครั้งที่เตรียมผลึกด้วยวิธีนี้จะได้ผลึกที่เป็นพหุผลึกที่มีเกรนใหญ่ แต่ว่าจะพบรอยแยกทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ถ้าเราทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงอุณหภูมิ 1020 - 700 องศาเซลเซียส ให้ทำการลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง และในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ลดด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ส่วนในการเปลี่ยนอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 5 - 10 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลึกไม่ติดกับผนังของภาชนะ

- การเพิ่มอุณหภูมิ

ธาตุที่ทำการบรรจุหลอดที่มีการปิดสนิทแล้วนำไปเข้าเตาเพื่อนำการหลอมสารนั้น การเพิ่มอุณหภูมิทำได้โดย

1. การเพิ่มอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แรกต้องใช้เวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนของไอ Se และ In ที่อุณหภูมิมากกว่า 217 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1080 องศาเซลเซียส แล้วให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อลดการเกิดช่องว่างขึ้นในเนื้อผลึก
 - การลดอุณหภูมิ
 1. ลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจนถึง 1000 องศาเซลเซียส
 2. ช่วง 1000 - 950 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เพื่อไม่ให้ผลึกนั้นเย็นตัวลงเร็วเกินไป
 3. ช่วง 950 - 850 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ช่วง 850 - 750 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เพื่อลดอัตราการเกิดรอยแตก เพราะที่ 810 องศาเซลเซียส เป็นจุดเปลี่ยนเฟสของสารประกอบ
 4. ช่วง 750 - 300 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
 5. เมื่ออุณหภูมิถึง 300 องศาเซลเซียส แล้วให้ทำการปิดเตาได้

4.4 การเตรียมฟิล์มบาง [10]

4.4.1 การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสาร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการระเหยสารที่สร้างขึ้นเองมีเพียงระบบควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ เพื่อให้แผ่นรองรับมีอุณหภูมิตามต้องการ ซึ่งมีผลต่อการจัดเรียงตัวของสารที่ระเหยขึ้นไปติดกับแผ่นรองรับ

4.4.1.1 ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

การให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับ เพื่อให้มีพลังงานที่เหมาะสมแก่โมเลกุลของสารที่ทำการระเหยขึ้นไปติดกับแผ่นรองรับ โดยการให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นโครงผลึกได้ดีขึ้น การให้ความร้อนต้องควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ค่าหนึ่ง ระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมipระกอบด้วยอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.2

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับคือ

1. ชุดแสดงค่าอุณหภูมิ ใช้แสดงค่าอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่วัดได้โดยเทอร์โมคัปเปิล
2. เทอร์โมคัปเปิล ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของแผ่นรองรับโดยปลายของเทอร์โมคัปเปิลจะสัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นรองรับ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในระบบเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งสายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง Ni 10 % และ Cr 90 % และสายลบทำจากโลหะผสม Ni 95 % และ 5 % ของ Al , Mn , Si สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260 องศาเซลเซียส และ ที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิจัยครั้งนี้ สารตั้งต้นที่นำมาทำฟิล์มบางนั้น เราทำการเตรียมกัน โดยวิธี ไคเรกชันนัล ฟริชชิง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผลึก CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธี ไคเรกชันนัล ฟริชชิงนั้น เป็นก้อนสารที่มีขนาดใหญ่พอประมาณ ดังนั้นเมื่อเราจะนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ไปทำฟิล์มบางจึงต้องมีการเตรียมผลึก CuInSe_2 เพื่อนำไปใช้ทำฟิล์มบางต่อไป

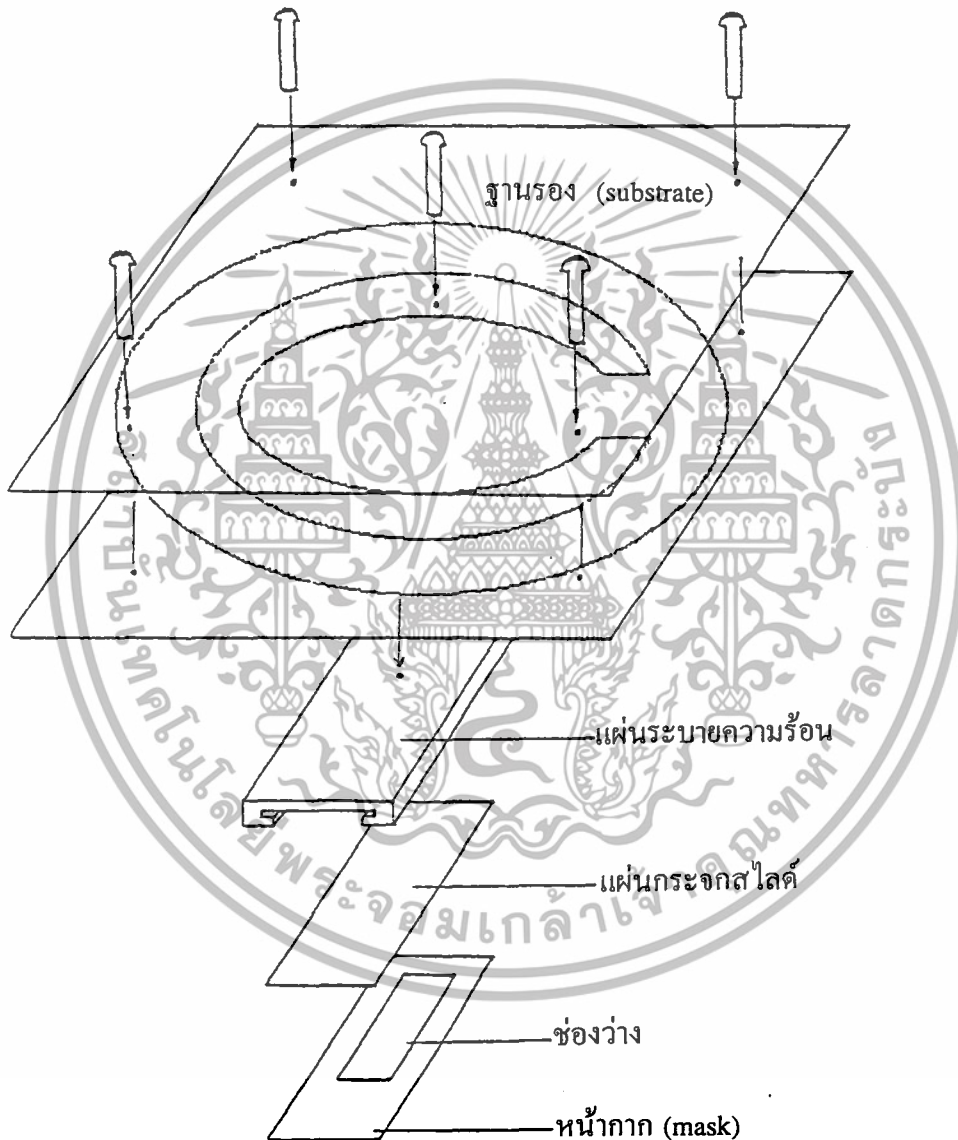
3. แผ่นรองรับ ลักษณะของชุดแผ่นรองรับประกอบด้วย

- แผ่นอลูมิเนียมด้านบน เจาะรูสำหรับสายของแผ่นความร้อน 2 สาย และสำหรับ นี้อต 5 ตัว
- แผ่นนำความร้อน (heater) ซึ่งเป็นแผ่นความร้อนของกาคัมน้ำ
- แผ่นอลูมิเนียมด้านล่าง เจาะรูสำหรับใส่ นี้อต 5 ตัว
- ที่วางแผ่นรองรับ โดยแผ่นรองรับเราใช้กระจกสไลด์และเป็น ที่วางหน้ากาคด้วย นั้นจะถูกยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียมด้านล่างด้วย นี้อตตัวกลางซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

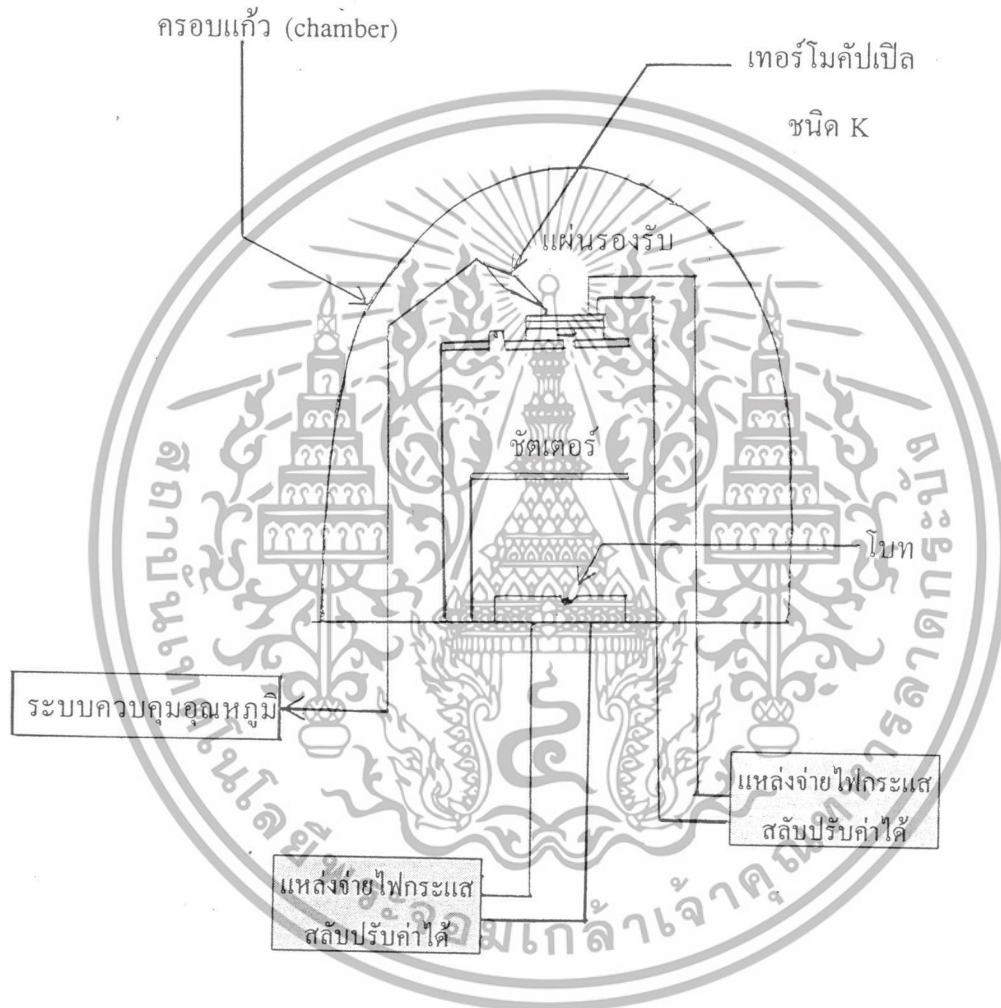


รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ให้ความร้อนกับแผ่นรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.2 ระบบให้ความร้อนกับโบท

โบทจะถูกให้ความร้อนด้วยหม้อแปลงตัวหนึ่งซึ่งเป็นคนละตัวที่ให้กับแผ่นรองรับ โดยในการควบคุมอุณหภูมิเราใช้วงจรเดียวกับที่ใช้ในควบคุมอุณหภูมิของเตาในการปลูกผลึก



รูปที่ 4.4 แสดงระบบการระเหยสารในสุญญากาศ

4.4.2 ขั้นตอนการทำฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ

โดยทั่วไปในการเตรียมฟิล์มบางจากระบบสุญญากาศนั้นจะมีขั้นตอนที่จะต้องทำและระมัดระวังดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ควรทำความสะอาดและเตรียมผิวหน้าของแผ่นรองรับ (substrate) ให้สะอาดและแห้ง
2. นำสารที่จะทำการเคลือบลงในโบท พร้อมทั้งวางกระจกสไลด์ที่จะนำมาเป็นแผ่นรองรับลงในกรอบแก้ว (chamber) ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นสารที่เคลือบมีความหนาสม่ำเสมอ
3. ปิดควาล์วของกรอบแก้วแล้วทำการดูดอากาศออกให้ความดันภายในให้ต่ำลงมาเหลือประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์ โดยใช้ปั๊มโรตารี (Rotary pump)
4. ปิดควาล์วของปั๊มโรตารี แล้วเปิดควาล์วของปั๊มดีฟิวชัน (diffusion pump) เพื่อทำให้ความดันภายในกรอบแก้ว ลดลงเหลือราว 5×10^{-5} ทอร์
5. เริ่มทำสารที่จะเคลือบให้เป็นไอ โดยมีกัมบังเพื่อมิให้สารที่เจือปนอยู่ไปเคลือบแผ่นผลึก
6. ทำการเคลือบสารลงบนแผ่นผลึกให้หนาตามต้องการ (ขณะทำการเคลือบสารบนแผ่นกระจกสไลด์ บางครั้งควรให้ความร้อนที่เหมาะสมเพื่อให้ชั้นของสารที่เคลือบติดแน่นกับแผ่นสไลด์)
7. หยุดทำการเคลือบสาร ปล่อยให้ทุกอย่างภายในกรอบแก้วเย็นตัวลง
8. ปล่อยอากาศเข้าไปในกรอบแก้ว อย่างช้า ๆ จนความดันเป็นความดันปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

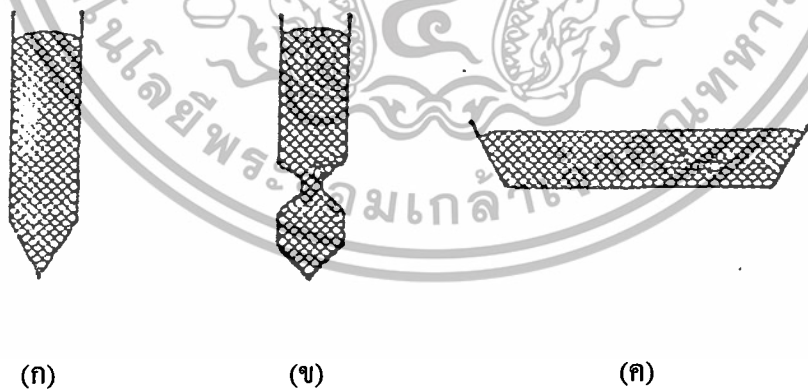
บทที่ 5

การเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ จากสภาวะหลอมเหลว

ในการเลือกวิธีการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับเทคนิคบางอย่างเท่านั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง การเตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลวมีมากมายวิธีที่กระทำทั้งในระบบเปิด (open system) และ ระบบปิด (close system) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของธาตุในขณะที่กำลังหลอมเหลว อย่างเช่น กรณีที่มีความดันไอสูงมักจะใช้ระบบปิดในการเตรียมผลึก เพื่อป้องกันการสูญเสียธาตุที่มีความดันไอสูงซึ่งจะทำให้สารตัวอย่างที่ได้มีสมบัติต่างไปจากสัดส่วนสเตอยคิโอเมตริกตามที่ต้องการ ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมผลึกแบบไครเรชันนัล ฟริชชิง [11,14] และ โดยวิธีบริดจ์แมน (Bridgman method)

5.1 วิธีไครเรชันนัล ฟริชชิง [2,11,15]

วิธีนี้มีการใช้กันมาช้านานและเป็นที่แพร่หลายในการเตรียมผลึกเอกพันธ์จากสภาวะหลอมเหลวโดยให้ส่วนที่หลอมเหลวและส่วนที่กำลังแข็งเป็นผลึกอยู่ในภาชนะเดียวกัน รูปร่างของภาชนะมีหลายแบบดังตัวอย่างในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของภาชนะที่ใช้ในการเตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลว

โดยที่ภาชนะในรูปในรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) มักใช้กับเตาหลอมสารที่ตั้งอยู่ในแนวตั้ง ส่วนในรูป (ค) ใช้กับเตาในแนวนอนบรรจธาตุหรือผลึกหลายรูป เมื่อทำการเตรียมผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกสรรแล้ว นำภาชนะเข้าไปวางในเตา ณ ตำแหน่งที่ต้องการ การเพิ่มอุณหภูมิของเตาให้สูงขึ้นจนภายในภาชนะหลอมเหลวใช้เวลาในการหลอมระยะหนึ่งจึงเริ่มลดอุณหภูมิลง สารจะเริ่มเย็นจากด้านปลายที่แหลมของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งจนแข็งเป็นแท่งตามรูปภาชนะ ในการที่เริ่มให้ส่วนปลายแหลมแข็งตัวก่อนเพราะเชื่อว่า บริเวณปลายแหลมมีปริมาตรของสารน้อยกว่าส่วนอื่นจะทำให้เกิดนิวคลีเอชัน (nucleation) ของผลึกเดี่ยวก่อนแล้วจึงทำให้ส่วนอื่นเกิดขึ้นตามมาจนเป็นผลึกเดี่ยวตลอดทั้งแท่ง ถ้าเลือกภาชนะที่ไม่เหมาะสมสารที่กำลังหลอมอาจจะทำปฏิกิริยากับผนังของภาชนะอันจะทำให้ผลึกที่เตรียมได้มีสิ่งเจือปนหลุดออกมาจากภาชนะ อีกทั้งยังทำให้เกิดนิวคลีเอชันเทียม (spurious nucleation) ทำให้ผลึกเดี่ยวเกิดขึ้นพร้อมกันหลายแท่ง ซึ่งจะได้แท่งสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยผลึกเดี่ยวหลายเกรนอยู่ด้วยกันอันเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้การเกิดนิวคลีเอชันเทียมยังมีผลทำให้ผลึกติดแน่นกับผนังของภาชนะ ในขณะที่ทำการลดอุณหภูมิให้ต่ำลง แท่งผลึกที่เตรียมได้จะมีรอยแตกร้าว (bulk cracks) เนื่องจากแรงดัน (stress) เกิดขึ้นจากสาเหตุที่สัมพันธ์กับการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของผลึกและภาชนะที่มีค่าต่างกัน

5.2 วิธี ของบริ ดจ์แมนสโตคบาร์ เอร์ [2,11]

หลักการโดยทั่วไปของการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีบริดจ์แมน คือ การให้ภาชนะที่บรรจุสารหรือสารประกอบตั้งต้นเคลื่อนที่ผ่านเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (temperature gradient) ภายในเตาจากส่วนหนึ่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้น ไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ การเลือกใช้ขนาดของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิก็น่าจะเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก ในการเตรียมผลึกของสารประกอบซาลโคไฟโรทีนนิยมใช้เกรเดียนท์ของอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15 - 20 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร

การเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีบริดจ์แมนสโตคบาร์เอร์สามารถใช้ได้กับทั้งเตาชนิดสองโซนและโซนเดี่ยว และเราสามารถเลื่อนเตาแทนการเลื่อนภาชนะได้ด้วย แทนที่เราจะเลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือแต่เปลี่ยนเป็นการเลื่อนตัวเตาไปทางด้านขวามือด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับที่ใช้เลื่อนภาชนะไปทางซ้ายมือ โดยออกแบบให้เตาเลื่อนอย่างอิสระและภาชนะต้องนั่งอยู่กับที่ ในขณะที่เตาเลื่อนไปสารจะเริ่มแข็งตัวอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับอัตราเร็วในการเลื่อนของเตา

5.3 วิธี ลดอุณหภูมิ [11]

วิธีนี้เป็นที่นิยมเช่นกันเนื่องจากไม่ต้องมีการเลื่อนภาชนะหรือเลื่อนเตาแต่สิ่งสำคัญอยู่ที่การเลือกใช้เตาโซนเดี่ยวที่มีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการเตรียมและเกรเดียนท์ของอุณหภูมิกวอร์จะมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

เซลล์แสงอาทิตย์ กึ่งคอปเปอร์ อินเดียมไดซัลไฟด์

โลกเราในยุคนี้เริ่มมีปัญหาคขาดแคลนแหล่งพลังงานมากขึ้นอย่างเช่น ได้มีการคาดกัน ว่าป่าไม้นั้นจะหมดภายในอนาคต จึงได้มีการคิดค้นหาวิธีการอื่น ๆ ที่จะได้พลังงานมา โดยในปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจที่จะนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้งาน

ในปัจจุบันนี้ได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ทำกาเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์นี้เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) โดยสารกึ่งตัวนำที่ได้รับ ความสนใจอยู่ในขณะนี้ เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่ กลุ่ม IV , รอยต่อ ของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI₂ กับ II-VI เป็นต้น เพื่อให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี ประสิทธิภาพสูงขึ้น นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจศึกษาขบวนการการปลูกผลึกเพื่อให้ได้ ผลึกเดี่ยว (single crystal) ของสารประกอบเชิงสาม (ternary material) [6] ได้แก่ CuInS₂ , CuInSe₂ , CuInTe₂ , AgInSe₂ , AgInS₂ และ CuGaSe₂ มานานแล้ว โครงสร้างของผลึกเหล่านี้เป็น โครงสร้างแบบซาลโคไพไรต์ (chalcopyrite structure) สารประกอบเหล่านี้สามารถแสดง ปรากฏการณ์พลังงานโฟโตโวลตาอิก (photovaltatic potential) [8] ในสารประกอบกึ่งตัวนำ CuInSe₂ จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.83 - 2.0 อิเล็กตรอนโวลต์ [16] ซึ่งสามารถทำการผลิตให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น หรือ พี (n- or p-type) ก็ได้ และมี ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap)

CuInSe₂ ที่เป็นฟิล์มบางนั้นยังคงมีค่าพลังงานแถบหวงห้ามแบบตรง ประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่ามากกว่า 10⁵ ต่อเซนติเมตร (cm⁻¹) ซึ่งมี ค่าสูงกว่าสารกึ่งตัวนำอื่นที่สามารถพบได้ในทุกวันนี้ [9]

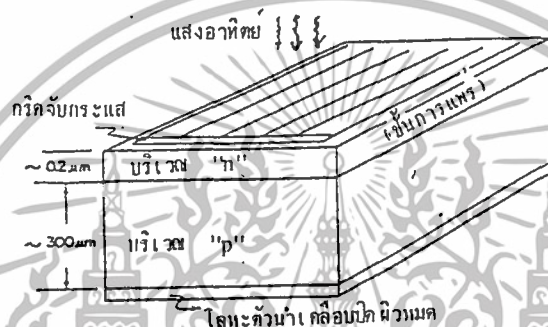
โครงการพิเศษนี้ให้ความสนใจในการศึกษากระบวนการการปลูกผลึก CuInSe₂ ด้วย วิธีการแบบไครเรชันนัล ฟริชชิง และการศึกษาถึงคุณสมบัติของฟิล์มบาง CuInSe₂ ซึ่งมี ประสิทธิภาพในการนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการสร้างเซลล์แบบ รอยต่ออวิวิพพันธุ์ (heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe₂/CdS โดยกระบวนการไอระเหย สารเคมี (evaporation) ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

6.1 เซลล์แสงอาทิตย์[17,18]

6.1.1 โครงสร้างและรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ โดยมีความหนาประมาณ 10 - 300 ไมโครเมตร ผิวหน้าของเซลล์ด้านรับแสงจะมีขั้วไฟฟ้าที่มีรูปแบบคล้ายนิ้วมือ (grid) ส่วนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่รับแสงนั้นจะฉาบด้วยสารต้านทานการสะท้อน ส่วนผิวด้านล่างจะมีขั้วไฟฟ้าเคลือบไว้ที่ผิว

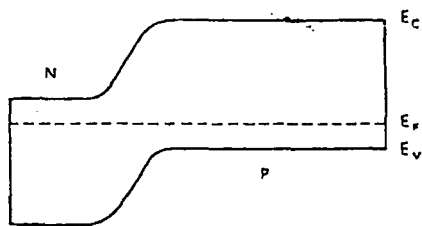


รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

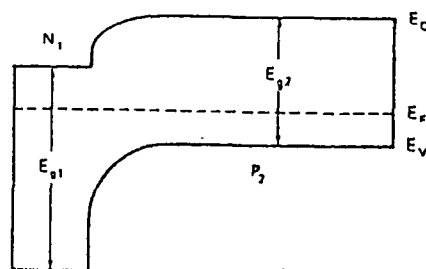
ประเภทของรอยต่อที่ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์อาจแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. สารกึ่งตัวนำประเภทรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) เซลล์ชนิดนี้ภายในเซลล์จะมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำแบบชนิดเอ็นและชนิดพี ซึ่งได้มาจากสารกึ่งตัวนำชนิดเดียว เช่น ซิลิกอน และแกลเลียมอาเซนายด์ เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำประเภทรอยต่ออวิวิธพันธ์ (heterjunction) เซลล์ชนิดนี้รอยต่อของสารกึ่งตัวนำเกิดสารมากกว่าหนึ่ง เช่น รอยต่อระหว่าง $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$, As/GaAs , $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ เป็นต้น
3. รอยต่อแบบชอตกกีแบเรีย (Schottky barrier junction) รอยต่อแบบนี้เป็นรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เช่น รอยต่อระหว่างแพลทินัมกับซิลิกอน (Pt/Si) แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อทั้ง 3 ชนิด แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 6.2

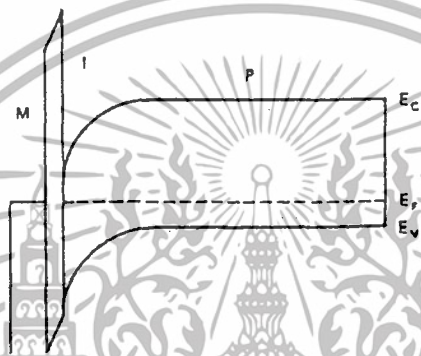
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) รอยต่อเอกพันธุ์



(ข) รอยต่อวิวิธพันธุ์



(ค) รอยต่อข้อตักโคโฮต

รูปที่ 6.2 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ

(ก) รอยต่อเอกพันธุ์

(ข) รอยต่อวิวิธพันธุ์

(ค) รอยต่อข้อตักโคโฮต

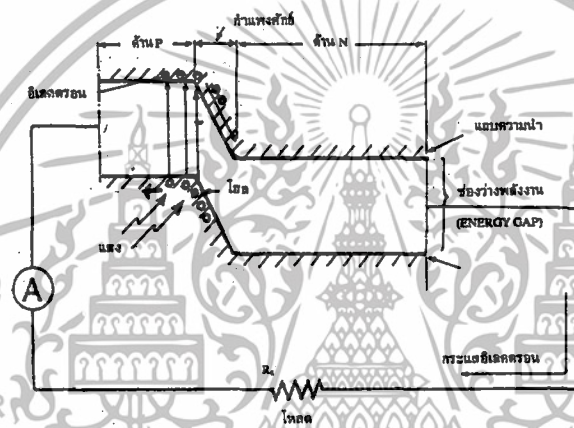
6.1.2 การเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [17,18]

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีรังสีของแสงอาทิตย์ตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำใกล้เคียงบริเวณศักย์ขวางกั้นในตัว (potential barrier) ที่รอยต่อ

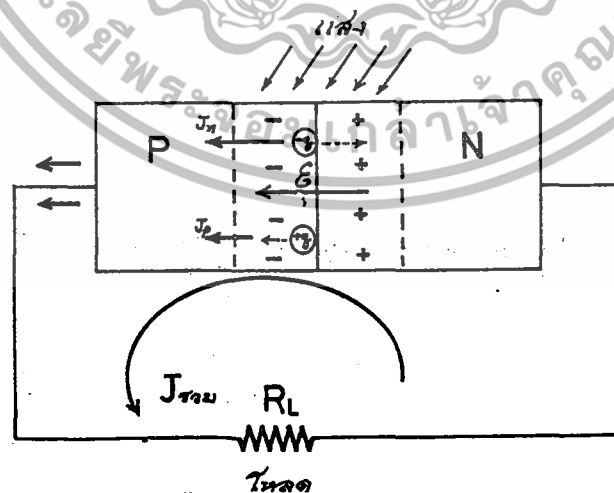
จากแผนภาพของแถบพลังงานของรอยต่อเอกพันธุ์แบบพี-เอ็น ในรูปที่ 6.3 เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อเอกพันธุ์ ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน E_g เพียงค่าเดียว ดังนั้นเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบบนมีพลังงานมากกว่า $h\nu$ แล้ว อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนโฟตอนที่ตกกระทบบนแล้ว นั่นคืออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบเวเลนซ์ไปอยู่ที่แถบการนำเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron-hole pair) โดยที่พาหะดังกล่าวนี้จะมาออกันบริเวณทั้งสองด้านของรอยต่อ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะนี้จะแพร่ไปยังรอยต่อ พาหะที่เกิดที่ระยะทางต่ำกว่าความยาวแห่งการแพร่ (diffusion length) จากสักร์ขวางกันแล้วเมื่อมาถึงรอยต่อจะถูกแยกด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ โดยอิเล็กตรอนจะถูกทำให้เข้าไปในด้านเอ็น ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่เข้าไปในด้านพี การเคลื่อนที่ของพาหะในขณะนี้เป็นารเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (drift) ในสนามไฟฟ้า เมื่อพาหะเคลื่อนที่ออกนอกรอยต่อเข้าสู่เนื้อวัสดุ (bulk material) พาหะจะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยการแพร่ (diffusion) แล้วพาหะจะเคลื่อนที่ออกนอกตัวเซลล์ไหลผ่านโหลด (load) จนครบวงจร ดังรูปที่ 6.4



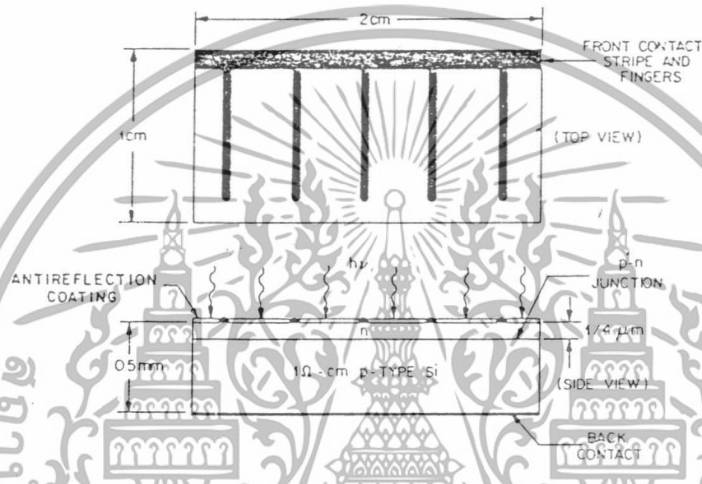
รูปที่ 6.3 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะได้รับแสง



รูปที่ 6.4 แสดงการเกิดกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเนื่องจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ [18] มีส่วนต่าง ๆ หลายส่วนซึ่งประกอบด้วย รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งอยู่ไม่ลึกนัก (shallow p-n junction) ขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (grid) ขั้วไฟฟ้าด้านล่าง (back ohmic contact) ซึ่งปกคลุมผิวด้านหลังทั้งหมดและยังมีการเคลือบชั้นสารป้องกันการสะท้อนไว้บนผิวด้านรับแสงด้วย



รูปที่ 6.5 แสดงโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์

6.1.3 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น [17,18]

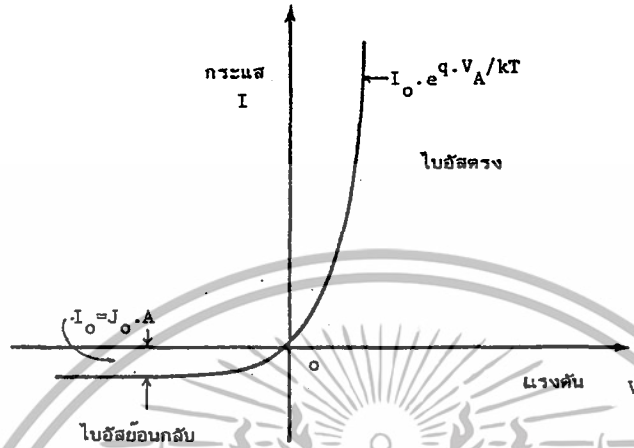
- ในกรณีที่รอยต่อพีเอ็นไม่ได้รับแสง(dark)

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 6.6 ลักษณะกราฟในรูปที่ 6.6 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนสมการได้ว่า

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง(dark)

$$I = I_s (\exp(qV/kT) - 1) \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

- ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (illumination)

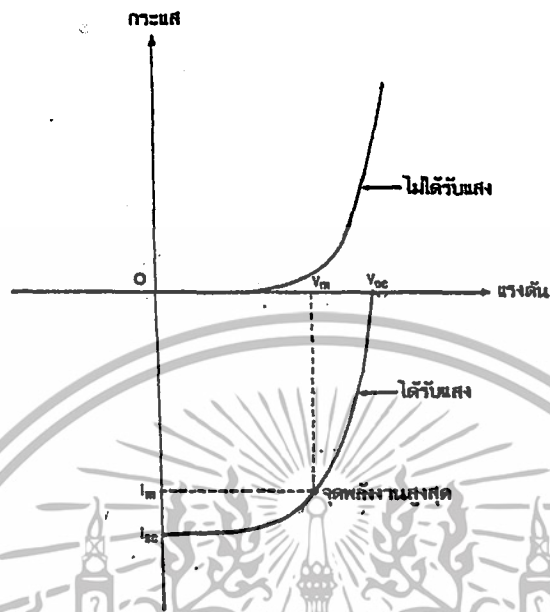
ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณาว่าในลำแสงประกอบด้วยกลุ่มของโฟตอน (photon) ซึ่งมีพลังงาน $E = h\nu$ เมื่อแสงตกกระทบบรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเป็นเนื้อสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายพลังงานให้แก่คู่อิเล็กตรอนด่างที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron hole pair) ที่บริเวณรอยต่อ แล้วเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสแสง (photo current) หรือ เขียนย่อ ๆ ว่า I_L

กรณีที่รอยต่อได้รับแสง (illumination)

$$I = I_s (\exp(qV/kT) - 1) - I_L \quad (6.2)$$

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสงและไม่ได้รับแสงสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 6.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ
ขณะที่ได้รับแสงไม่ได้รับแสง

6.1.4 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [17,18]

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะของ โครงสร้างคล้ายของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงเหมือนกับของรอยต่อพี-เอ็น และจากการที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงพูดได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์ถูกลัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแส เนื่องจากว่ากระแสที่ไหลออกจากเซลล์ผ่านวงจรในภาวะนี้มีค่าสูงสุดซึ่งเราเรียกกระแสนี้ว่า กระแสลัดวงจร (short circuit current) เขียนย่อ ๆ ว่า I_{sc}

โดยที่ขณะลัดวงจร $V = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (6.2) จะได้ว่า

$$I = -I_L = I_{sc} \quad (6.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่เซลล์ถูกทำการเปิดวงจรออก และที่รอยต่อได้รับแสงจะพบว่ากระแสที่ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากว่าวงจรถูกเปิด ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมจึงเป็นแรงดันที่มีค่าสูงสุด เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันวงจรเปิด (open circuit) หรือ V_{oc}

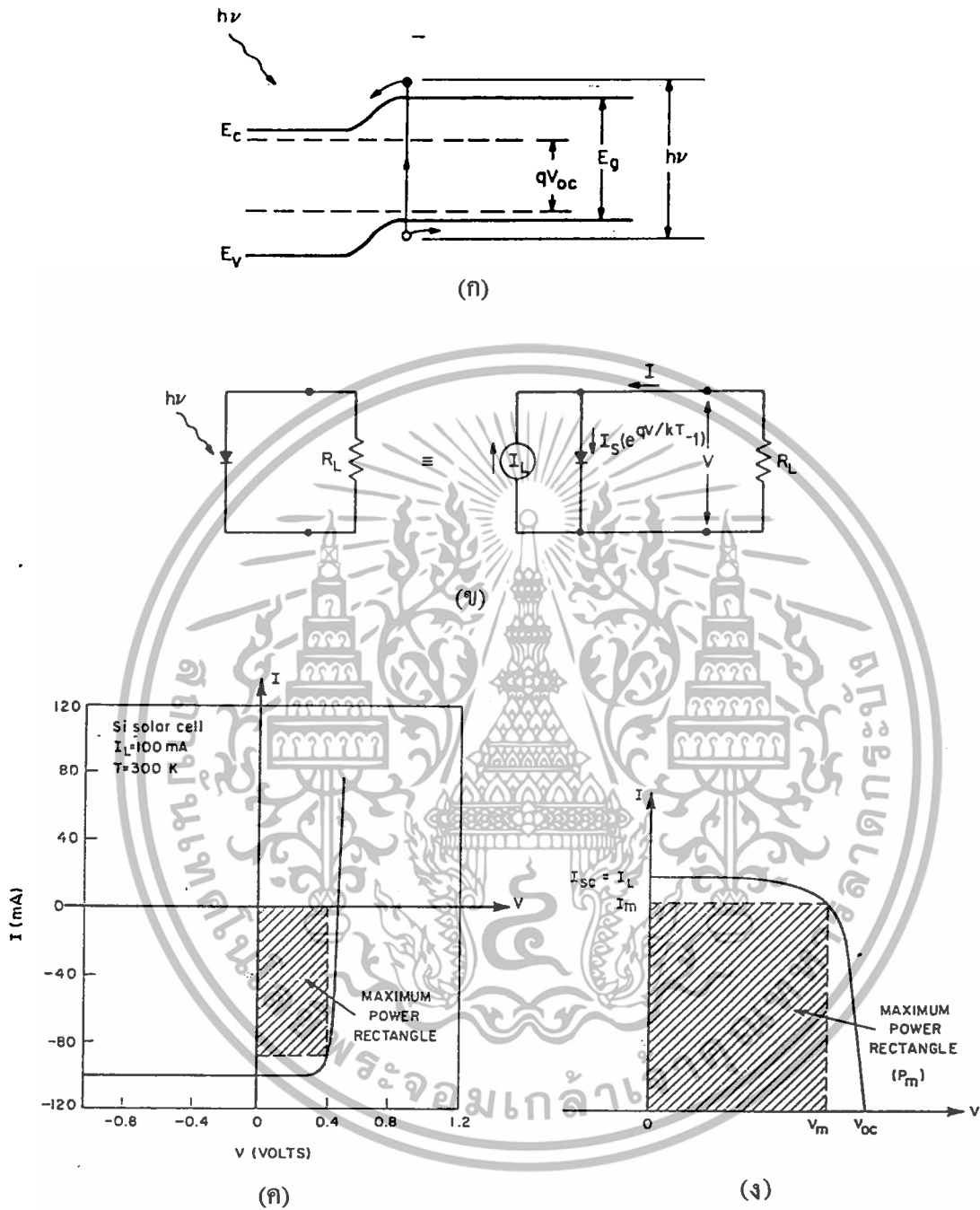
ขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจร , $I=0$ จากสมการ (6.2) จะได้ว่า

$$= V_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_L}{I_s} + 1 \right)$$

$$_{oc} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (6.4)$$

ค่าของ I_{sc} และ V_{oc} แสดงไว้ในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงดังรูปที่ 6.8





รูปที่ 6.8 (ก) แผนภาพพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ได้รับแสง
 (ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์
 (ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกฉายแสง
 (ง) ภาพกลับหัวของรูป (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ (Heterojunction solar cell) [17]

รอยต่ออวิวิธพันธุ์เป็นรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำ 2 ตัวที่มีช่องว่างแถบพลังงานต่างกัน แผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ชนิดเอ็นบนพีแสดงดังรูปที่ 6.9 แสงซึ่งมีพลังงานน้อยกว่า E_{g1} แต่มากกว่า E_{g2} จะสามารถผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกไปได้ ซึ่งคล้ายกับว่าสารกึ่งตัวนำตัวแรกเป็นหน้าต่าง (window) แต่จะถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำที่สอง พาหะที่ถูกสร้างขึ้นมาในบริเวณเขตปลอดพาหะ และภายในความยาวแห่งการแพร่ (diffusion length) ของรอยต่อนั้นจะมีการสะสมไว้เช่นเดียวกับในรอยต่อชนิดเอ็นบนพี แสงที่มีพลังงานมากกว่า E_{g1} จะถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำตัวแรก และพาหะที่เกิดขึ้นภายในความยาวแห่งการแพร่จากรอยต่อก็จะมี การสะสมเช่นเดียวกัน

ข้อดีของรอยต่อแบบอวิวิธพันธุ์ที่ได้เปรียบรอยต่อแบบเอกพันธุ์ คือ

1. จำนวนเซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์มีมากกว่าแบบรอยต่อเอกพันธุ์ในแง่ของการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำได้หลายตัว
2. จุดเด่นของโครงสร้างเซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ คือแสงสามารถผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างได้โดยไม่ถูกดูดกลืน แต่จะถูกดูดกลืนบริเวณฐานซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานแคบกว่าทำให้เพิ่มค่าการตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับความยาวคลื่นต่ำ แต่ E_{g1} ต้องมีพลังงานที่สูงพอด้วย ในขณะที่เซลล์แบบรอยต่อเอกพันธุ์โฟตอนพลังงานสูงมักจะถูกดูดกลืนบริเวณผิวหน้า และเกิดการรวมตัวที่ผิวหน้าทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพลดลง
3. มีค่าความต้านทานอนุกรมต่ำ ถ้าสารกึ่งตัวนำตัวแรกนี้ได้รับการได้เป็นอย่างดีโดยไม่กระทบต่อสมบัติการส่งผ่านแสง
4. ทนต่อการแผ่รังสีที่แรง ๆ ได้ดี ถ้าสารกึ่งตัวนำตัวแรกที่มีความหนาพอรวมทั้งมีค่าของช่องว่างแถบพลังงานสูงด้วย

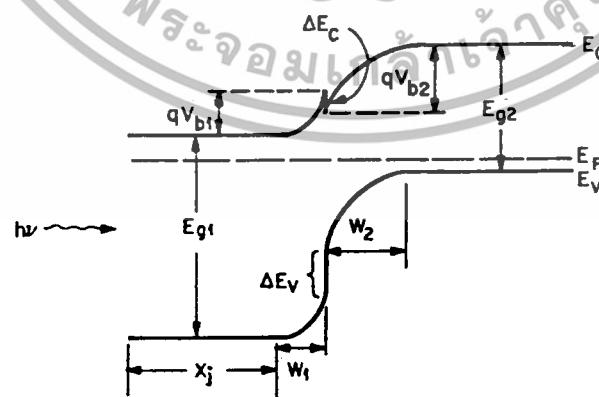
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cell) [17]

ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางประกอบด้วย ชั้นของ สารกึ่งตัวนำ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) , ซิลิกอน (Si) , แกลเลียมอาเซนายด์ (GaAs) , และแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ก่อตัวบนฐานรอง (substrate) อาจเป็นพลาสติก กระเบื้องเคลือบโลหะหรือกราฟไฟท์ เป็นต้น การก่อตัวบนฐานรองมีหลายวิธี เช่น การปลูกผลึกโดยไอ (vapor growth) การระเหยโดยพลาสมา (evaporation plasma) หรือ การชุบ (plating) ปกติถ้าสารกึ่งตัวนำมีความหนามากกว่าส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืน สารกึ่งตัวนำตัวนั้นจะดูดกลืนแสงได้มาก ถ้าความยาวแห่งการแพร่ยาวกว่าความหนาของฟิล์ม พหุหะเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมไว้ได้

ข้อดีของเซลล์ชนิดฟิล์มบาง คือ ราคาต่ำเนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ยาก วัสดุก็มีราคาถูก ส่วนข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้คือให้ประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากผลขอบเขตของเกรน (grain boundary) และส่วนหนึ่งจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ก่อตัวบนฐานรองที่มีคุณภาพไม่ดีพอ

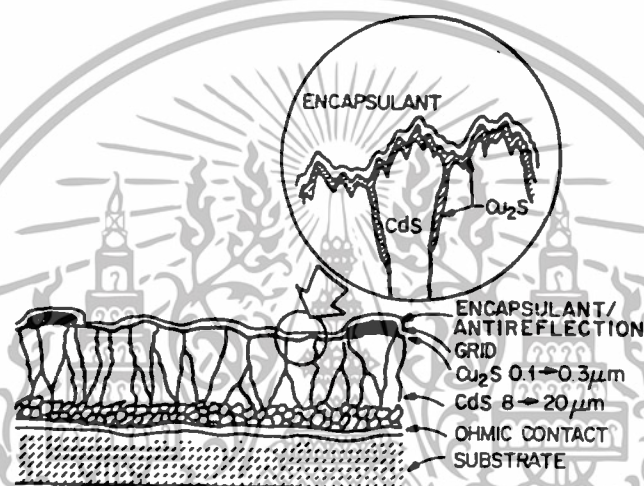
โครงสร้างตัวอย่างของเซลล์ชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 6.10 เป็นฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์ เซลล์ตัวนี้เป็นรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ มีความหนาแน่นของกับดักระหว่างหน้ามาก แสงส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนใน Cu_2S การตอบสนองเชิงสเปกตรัม และกระแสจากแสงจะถูกจำกัด เนื่องจากความเร็วในการรวมตัวกันของพาหะที่ผิวหน้าสูง ความยาวแห่งการแพร่สั้นและมีการรวมตัวระหว่างหน้ามาก ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานประมาณ 9%



รูปที่ 6.9 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ก็เป็นเซลล์ชนิดฟิล์มบางแบบรอยต่อวิวิธพันธุ์อีกตัวหนึ่งที่ถูกให้ความสนใจในมากตัวหนึ่ง ยังมีสารประกอบไตรภาค (ternary compound) อีกหลายตัวที่น่าสนใจ สำหรับเซลล์ราคาต่ำ ได้แก่ กลุ่มสารกึ่งตัวนำระหว่างกลุ่ม I-III-VI₂ และ II-IV-V₂



รูปที่ 6.10 แสดง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ [17]

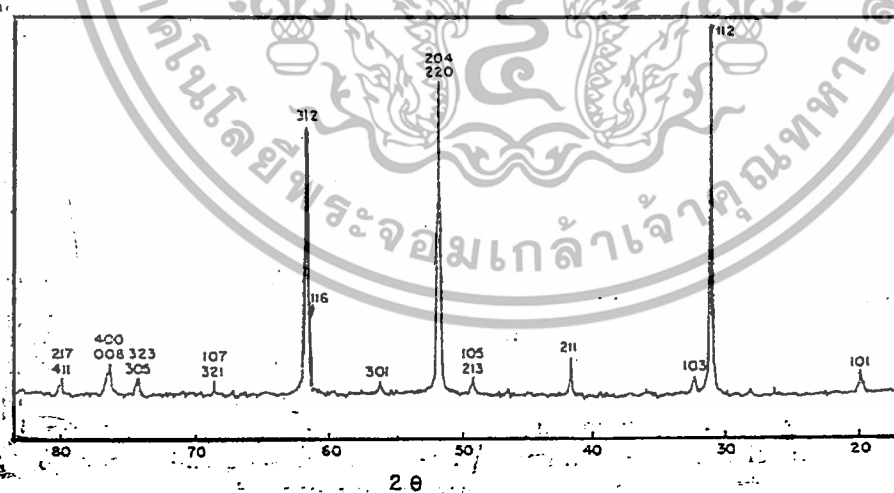
6.4 คุณสมบัติของ CuInSe_2 [8]

โดยทั่วไปทั้งผลึกเดี่ยวและผลึกหลายรูปจะแสดงคุณสมบัติหรือพฤติกรรมที่คล้าย ๆ กัน แม้ว่าขนาดของเกรนอาจมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติบางอย่างเช่น สภาพต้านทาน (resistivity)

ที่สภาวะสมดุล เฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม (pseudobinary phase diagram) ของ $\text{Cu}_2\text{Se}/\text{In}_2\text{Se}_3$ แสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) ของ CuInSe_2 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 810 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสัดส่วนตามสัดส่วนสตรอยคิโอเมตริก (stoichiometric) โครงสร้างซาลโคไพไรท์จะมีเสถียรภาพในช่วงกว้างในทิศที่มีสัดส่วนของ In และ Se เพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วสัดส่วนโมเลกุลของ In_2Se_3 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.58 (ที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส) โดยที่ Se ส่วนเกิน (In loss) ในระหว่างการปลูกผลึกในระบบสุญญากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นในการเตรียมสารโดยใช้กระบวนการระเหยสาร (evaporation)

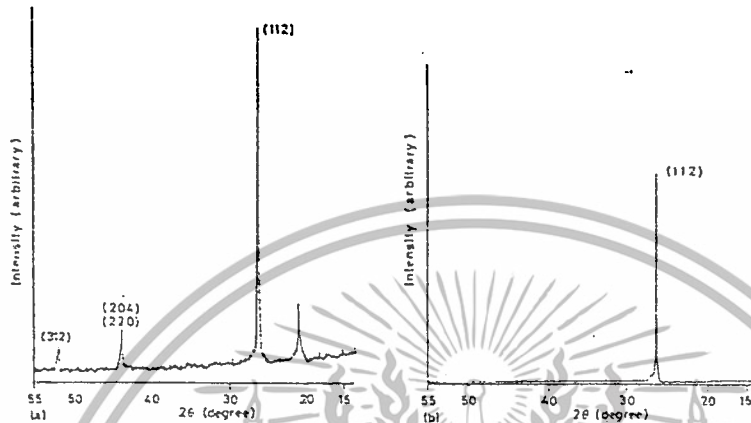
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CuInSe_2 ที่ เป็น ก้อน สาร นั้น เรา สามารถ ทราบ พะ ช่าง มาก และ โครงสร้าง ได้ โดย การ เลี้ยวเบน ของ รังสี เอกซ์ (X-ray diffraction , XRD) และ SEM จากรูปที่ 6.11 เป็น XRD spectrum ของ ผลึก หลาย รูป CuInSe_2 ที่ ตก ตะกอน (deposited) บน Mo ซึ่ง ใน การ วัด ค่า ค่าง ที่ ของ แล ท ที่ สัน นั้น ยืนยัน ได้ ว่า มี โครงสร้าง แบบ ซาล โดไฟไรท์ สำหรับ ชั้น ที่ เป็น Cu-rich พิก ของ XRD (XRD peak) นั้น จะ แสดง พิก ของ Cu_2Se ด้วย ขนาด เกรน ของ ชั้น CuInSe_2 อาจ คำนวณ ได้ จาก ความ สูง ของ พิก XRD โดย ส่วน มาก แล้ว ขนาด เกรน ของ พิล์ม บาง จะ มี ขนาด ใหญ่ กว่า 100 นาโนเมตร ซึ่ง เรา ไม่ สามารถ คำนวณ ได้ จาก ความ กว้าง ของ พิก XRD โดย ทั่วไป แล้ว ขนาด เกรน นั้น ทราบ ได้ จาก วิธี SEM



รูปที่ 6.11 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกผง CuInSe_2 ชนิดเอ็น [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ p-CuInSe₂ ซึ่งเป็นฟิล์มบาง [20]

6.4.1 สภาพต้านทาน (resistivity) ของฟิล์มบาง CuInSe₂ [8]

สามารถวัดได้โดยวิธีวัด 4 ขั้ว (four-point probe) ซึ่งค่าความต้านทานนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยเฉลี่ยของธาตุแต่ละชนิด ฟิล์ม CuInSe₂ ที่มี Cu มากกว่า 25 % โดยทั่วไปจะเป็นชนิดพี (p-type) มีสภาพต้านทานอยู่ช่วง 0.001-10 โอห์ม.เซนติเมตร หรือมากกว่า 1000 โอห์ม.เซนติเมตร และเป็นฟิล์มชนิดเอ็น (n-type) หรืออาจเป็นฟิล์มที่ไม่ได้รับการโด๊ป (intrinsic)

ในการวัดความต้านทานของสารไม่ว่าจะเป็นสารที่ยังไม่ได้รับการโด๊ป (หรืออาจเป็นชนิดเอ็นที่มีการโด๊ปแบบเบาบาง) หรือชนิดพีก็ตาม ความเที่ยงตรงในการวัดนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่อัตราส่วน Cu/In มีค่าเป็น 1.0 ซึ่งคล้าย ๆ กับที่พบในอัตราส่วนของธาตุซีลีเนียม/อะตอมโลหะ โดยที่ความเที่ยงตรงในการวัดจะมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของธาตุซีลีเนียม/อะตอมโลหะ นั้นมีค่ามากกว่า 1.0 ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยอาศัยพลังงานของจุดบกพร่อง (defect energies) และเฟสโคอะแกรมของ Cu-In-Se ดังแสดงดังรูปที่ 6.13 ฟิล์มที่มีธาตุซีลีเนียมมาก (Se-rich) นั้นจะมีทั้งจุดว่างของ Cu และ In (Cu and In vacancies, acceptor) ทำให้ฟิล์มบางในรูปแบบนี้มีชนิดเป็นพี ส่วนฟิล์มบางที่มีทั้ง In และ Se มากอยู่ทั้งคู่ (In-on-Cu-site) ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องแบบอะตอมผู้ให้ (donor defects) และเมื่อเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดว่างของ Cu ขึ้น ในฟิล์มที่มีธาตุอินเดียมมาก (In-rich) แล้วอาจจะทำให้สารนั้นมีความต้านทานสูงมากและฟิล์มแบบนี้อาจจะเป็นชนิดเอ็นหรือพีก็ได้ การเปลี่ยนชนิดการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมจำนวนของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น อย่างเช่น ปฏิริยาของจุดบกพร่องที่มีออกซิเจนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าหรือที่ขอบเขตเกรน (grain boundaries) ซึ่งเหตุการณ์นี้เป็นผลมาจากการแอนนีสฟิล์มในอากาศ

ส่วนฟิล์มที่มี Cu-rich (Cu-on- In-site) ฟิล์มแบบนี้จะเป็นชนิดพีแบบที่มีการได้เป็นอย่างดี (strongly p-type) ส่วนฟิล์มที่มีจุดว่างของธาตุอินเดียม (In-vacancies) นั้นส่วนมากจะเป็นฟิล์มชนิดพีมากกว่าที่จะเป็นชนิดเอ็น



รูปที่ 6.13 แสดงโคอะเกรมของส่วนประกอบ Cu-In-Se ซึ่งเป็นตัวกำหนดชนิดการนำไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนของธาตุแต่ละธาตุใกล้เคียงกับสัดส่วนสตอยคิโอเมตริ [8]

6.4.2 การแอนนีส (annealing)

การแอนนีสแผ่นฟิล์มจะช่วยทำให้การจัดเรียงของอะตอมในฟิล์มบางจัดเรียงเป็นระเบียบยิ่งขึ้น การแอนนีสฟิล์มยังส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทาน และ ทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้า ฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสแล้ว เมื่อนำไปทำเป็นอุปกรณ์แล้วจะมีคุณภาพที่ดีกว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้รับการแอนนีส อย่างเช่น $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการแอนนีสแผ่นฟิล์มบางก่อนนำไปใช้งานนั้นจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มดียิ่งขึ้น [1] ได้มีการสังเกตกันว่าก่อนผลึก CuInSe_2 ที่มีออกซิเจนในขณะที่แอนนีสนั้นอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของผลึก CuInSe_2 แต่ก่อนข้างที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของเกรนในผลึกหลายรูป ซึ่งทำให้สภาพต้านทานของผลึกหลายรูปไม่สามารถนำมาเป็นค่าความต้านทานเฉลี่ยของก้อนผลึกทั้งก้อนได้

6.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ [8]

โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงนั้นจะเป็นเซลล์แบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ที่มี CuInSe_2 เป็นฐาน [8] โดยเป็นรอยต่อระหว่างชั้นของ CuInSe_2 ชนิดพี กับชั้นของ CdS ชนิดเอ็น โดยที่ CuInSe_2 จะเป็นตัวดูดกลืนแสงทั้งหมดที่ผ่านจากชั้นของ CdS ออกมา แผ่นรองรับที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นกระจกสไลด์ที่มีความสะอาดมาก เหตุที่นิยมใช้กระจกสไลด์นี้มาเป็นแผ่นรองรับก็เพราะว่าเป็นสิ่งที่หาได้ง่าย ราคาถูก และ ผิวหน้าของกระจกก็จะเรียบมากด้วย ในโครงงานพิเศษนี้เราจะใช้โลหะอินเดียมเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว และ เราเลือกตัวนำที่โปร่งแสงเป็นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ซึ่งเป็นตัวขดนิยมตัวหนึ่ง ITO นี้จะเป็นตัวช่วยทำให้แสงที่เข้ามาซึ่งจะผ่านตัวขั้วไฟฟ้าแล้วนั้นจะไม่สะท้อนกลับออกมาอีก

บทที่ 7

วิธี ทดลองและผลการทดลอง

การดำเนินในขั้นแรกนั้นเริ่มจากการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ พร้อมทั้งทำการสร้างเตา เพื่อไว้ใช้ในการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 และทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ลดอุณหภูมิถึงกลศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการเตรียมผลึก หลังจากนั้นทำการเตรียมผลึก CuInSe_2 แล้วนำผลึกที่เตรียมได้นี้มาเป็นสารตั้งต้นในการทำฟิล์มบาง และนำทั้งผลึกและฟิล์มที่ทำการเตรียมได้นี้ไปทำการทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้กล่าวไปบ้างแล้วในข้างต้น

7.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซลเดียม

7.1.1 วัสดุที่ใช้ทำเตา

1. ขดลวดความร้อน ซึ่งเป็นขดลวดโลหะประเภทแคนทาล A-1 (kanthal alloy grade 1) ขดลวดประเภทนี้สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ถึง 1375 องศาเซลเซียส เส้นลวดที่นำมาใช้นี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร สาเหตุที่เลือกใช้ลวดนำความร้อนชนิดนี้เป็นตัวให้ความร้อน เนื่องจากเราสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย , อุณหภูมิที่ขดลวดนี้ให้ออกมานั้นมีความสม่ำเสมอ , มีเสถียรภาพสูง , ที่สำคัญขดลวดนี้สามารถทนอุณหภูมิได้สูงตามที่เราต้องการ และ ราคาเหมาะสมกับประสิทธิภาพ
2. ปูนทนไฟ
3. ฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันความร้อนที่เราเลือกใช้เป็นเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) ซึ่งเซรามิกไฟเบอร์ มี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เป็นก้อนสำลี และ ชนิดที่เป็นแผ่น ในการทดลองครั้งนี้เราเลือกใช้ชนิดที่เป็นแผ่น
4. อลูมิเนียม ในการทำกล่องใส่เตาเราใช้แผ่นอลูมิเนียมอย่างหนาแล้วทำการพ่นสีเพื่อทำให้เกิดความสวยงาม
5. ท่อพีวีซี , แผ่นสังกะสี เพื่อใช้เป็นแบบในการทำท่อเตาและฝาเตา
6. ลวดตาข่าย ลวดตาข่ายนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อ และตัวฝาเตาที่เราทำการหล่อขึ้น
7. แผ่นพลาสติก และ น้ำมันหล่อลื่น ของสองอย่างนี้ช่วยไม่ให้ปูนที่เราทำการหล่อนี้ติดกับแบบที่เราใช้ในการหล่อเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. อุปกรณ์อื่น ๆ ที่จำเป็นและสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการสร้างเตา

7.1.2 การสร้างเตา

● ท่อเตา

ภายในท่อเตานี้มีชุดลดนำความร้อนมีวนขดอยู่เป็นระยะห่างเท่า ๆ กัน โดยระยะห่างของชุดลดขดขึ้นอยู่กับความร้อนที่เราต้องการ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ระยะห่างของชุดลดประมาณ 0.5 เซนติเมตร มีขั้นตอนการทำได้ดังนี้

1. ใช้ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.5 เซนติเมตร เป็นแบบในการหล่อ โดยนำท่อพีวีซีมาผ่าครึ่งตามแนวทรงกระบอก เพื่อแยกการถอดแบบออก
2. นำแผ่นไม้ขนาด 2×100 ตารางเซนติเมตร 2 แผ่น นำมาขันน็อคโดยระยะห่างและความกว้างของไม้ 2 แผ่นนี้ รวมกันแล้วให้มีขนาดเท่ากับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อพีวีซีจากข้อ 1 แล้วนำไปวางระหว่างรอยต่อของท่อโดยไม้ทั้งสองนี้จะวางอยู่ในลักษณะที่เสมอกับผิวนอกของท่อ
3. นำแผ่นพลาสติกมาพันรอบท่อแล้วทำการยึดให้แน่น (แต่ถอดออกได้ในภายหลัง) แล้วทาด้วยน้ำมันหล่อลื่น (เพื่อไม่ให้ปูนติดกับพลาสติก)
4. พันลดนำความร้อนไปรอบ ๆ ท่อ โดยมีระยะห่างระหว่างรอบของชุดลดประมาณ 0.5 เซนติเมตร โดยพันเป็นระยะ ๆ ตามแนวแกนทรงกระบอกเป็นระยะทางยาวประมาณ 54 เซนติเมตร โดยการพันชุดลดนั้นต้องพันให้แน่น ชุดลดแต่ละรอบต้องมีระยะห่างเท่ากัน และต้องไม่สัมผัสกัน เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชุดลด
5. เมื่อพันชุดลดได้ระยะตามที่ต้องการแล้วให้เหล็บบลายลดไว้ที่ปลายท่อทั้งสองพอประมาณ ความยาวของลวดที่เหลือต้องยาวพอที่จะนำมาต่อกับส่วนจ่ายพลังงานภายนอก
6. เตรียมปูนที่จะใช้ในการหล่อให้อยู่ในสภาพพร้อมที่จะใช้งาน หลังจากนั้นนำปูนที่เตรียมแล้วมาทำการฉาบรอบ ๆ ชุดลดที่พันไว้ โดยไม่ต้องหนามากนัก
7. รอปูนให้แห้งพอ หมด ๆ แล้วทำการหุ้มด้วยลวดตาข่ายรอบปูนจากข้อ 6 การหุ้มด้วยลวดตาข่ายนี้จะเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อมากขึ้น
8. ทำการโบกปูนซ้ำอีกครั้ง โดยพยายามอย่าให้เกิดโพรงอากาศ ซึ่งความหนาของปูนในขั้นนี้ต้องหนาจนไม่สามารถที่จะเห็นลวดตาข่ายได้ แต่ก็อย่าหนามากเพราะจะทำให้ท่อเตามีน้ำหนักมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. รอให้ปูนแห้ง (ประมาณ 1-2 อาทิตย์) ในระหว่างรอปูนแห้งนี้ต้องทำการพรมน้ำพร้อมทั้งทำการยาปูนบริเวณที่มีรอยแตกร้าว
10. เมื่อปูนแห้งแล้ว ทำการนำเอาแบบพิมพ์ (ท่อพีวีซี) ออกโดยวิธีการเอาออกนั้นให้ทำการดึงไม้ 2 แผ่น (จากข้อ 2) โยกลงโยกมา ท่อพีวีซีก็จะหลุดออกมาจากปูนได้ง่าย

- ฝาเตา

ทำการหล่อปูนให้มีขนาด 30×30 ตารางเซนติเมตร เว้นช่องว่างตรงกลางให้มีขนาดเท่ากับท่อเตาที่ทำการหล่อเสร็จแล้ว พร้อมทั้งเว้นช่องว่างเล็ก ๆ สำหรับชั้นน็อคบริเวณใกล้กับของฝาเตา

- ก่อเตา

ก่อก่อที่บรรจุท่อเตานั้นทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 1 มิลลิเมตร พับให้เป็นก่อก่อขนาดความยาวประมาณท่อเตา

7.1.3 การประกอบเตา

นำท่อใส่ลงในก่อก่ออลูมิเนียม โดยให้อยู่ในตำแหน่งตรงกลางของก่อก่อ แล้วทำการบรรจุเซรามิกส์ไฟเบอร์ลงในบริเวณที่ว่างภายในก่อก่อให้แน่นพอสมควร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนขณะใช้งาน และก่อนที่จะนำเตาไปใช้งานจะต้องเริ่มจ่ายกระแสไฟให้แก่อเตาน้อย ๆ เป็นระยะเวลาช่วงหนึ่งเสียก่อน



รูปที่ 7.1 แสดงส่วนประกอบของเตาไฟฟ้าโซนเดียวที่ใช้ในการปลูกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.4 แหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิ

ระบบการควบคุมและแหล่งจ่ายไฟอาจเลือกใช้ตัวควบคุมชนิด เปิด-ปิด ที่ทำงานร่วมกับ ไทริสเตอร์ มาต่อเข้ากับเตาและแหล่งจ่ายไฟโดย ไทริสเตอร์จะค่อย ๆ ลดกระแสจนกระทั่ง ไทริสเตอร์หยุดทำงานซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิลดลง และ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงขีดจำกัดแล้ว ไทริสเตอร์จะเริ่มทำงานอีกครั้งหนึ่งแล้วก็จะค่อย ๆ เพิ่มกระแสขึ้น จึงไม่เกิดผลเสียแก่ขดลวด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

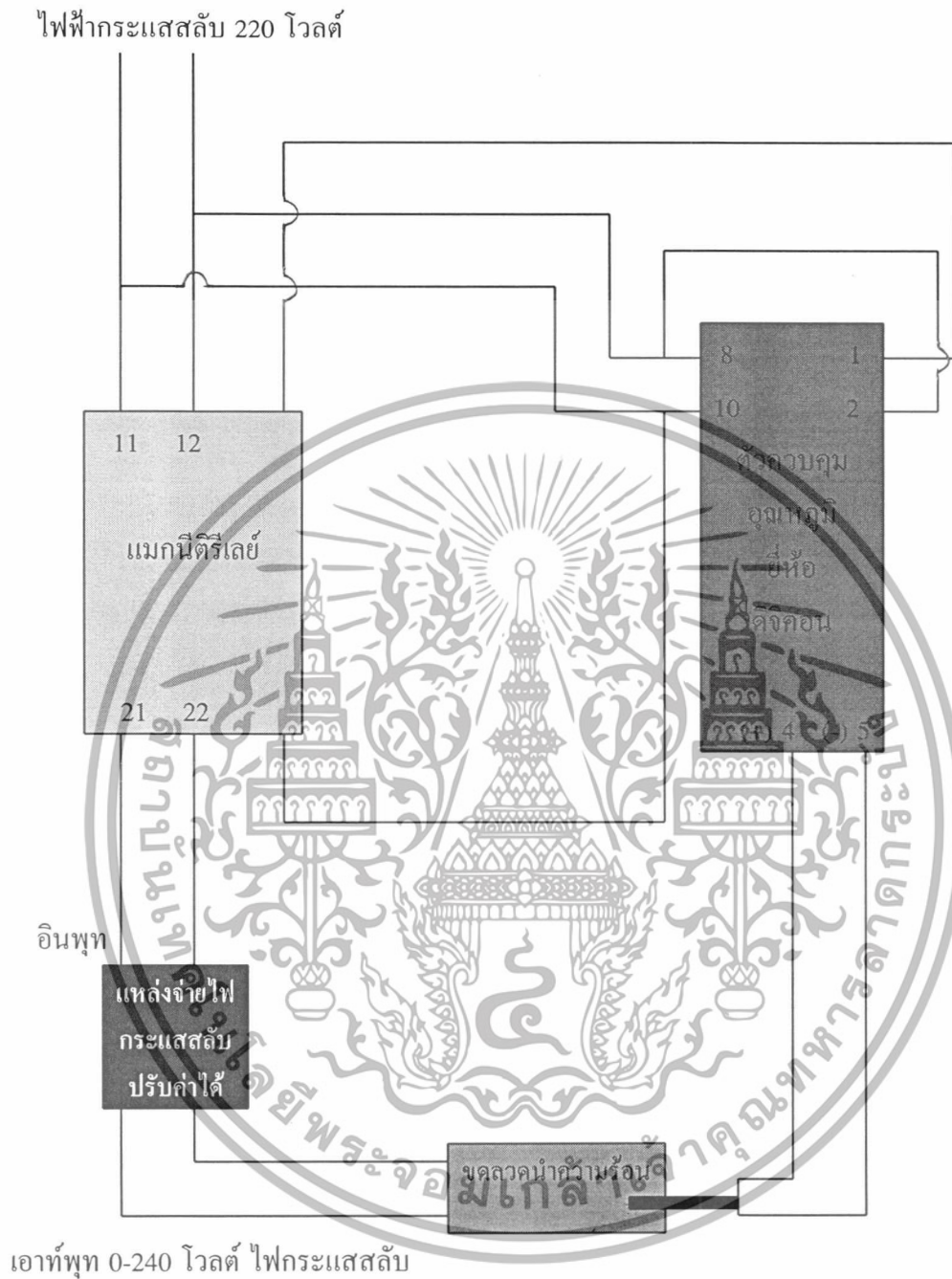
จากรูปที่ 7.2 เมื่อทำการจ่ายไฟเข้าไปให้กับขดลวดความร้อนภายในเตา เทอร์โมคัปเปิลจะเป็นตัววัดอุณหภูมิ แล้วทำการส่งค่าที่วัดได้ไปทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งค่าเอาท์พุทไปทำการควบคุมการทำงานของ ไทริสเตอร์โดยที่

- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ น้อยกว่า อุณหภูมิที่ตั้งไว้ เอาท์พุทที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ ไทริสเตอร์อยู่ในสถานะนำกระแสได้มาก (on state) จึงมีไฟป้อนเข้าขดลวดต่อไป
- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ ใกล้เคียง กับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เอาท์พุทที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ ไทริสเตอร์นำกระแสได้น้อยลง จึงเป็นการลดแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวด
- ถ้าอุณหภูมิที่วัดได้ มากกว่า อุณหภูมิที่ตั้งไว้ เอาท์พุทที่ออกมาจากตัวควบคุมจะทำให้ ไทริสเตอร์อยู่ในสถานะที่ไม่นำกระแส (off state) จึงไม่มีไฟป้อนเข้าขดลวด ในการควบคุม อุณหภูมิเราอาจใช้แมกนีติกรีเลย์แทน ไทริสเตอร์แต่อุณหภูมิที่ลดด้วยวิธีนี้จะไม่มีความต่อเนื่องเท่ากับที่เราใช้ ไทริสเตอร์เพราะว่าตัวแมกนีติกรีเลย์จะเป็นตัวตัดกระแสไฟจากแหล่งถึงเน็ดเข้าเตา โดยทันที



รูปที่ 7.2 แสดงแผนภาพการต่อแหล่งจ่ายพลังงานและส่วนควบคุมอุณหภูมิเข้ากับเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 แสดงการต่อวงจรของตัวควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ คจิกอน)
กับแหล่งจ่ายพลังงานโดยใช้แมกนีตริสเลย์

หมายเหตุ ตัวเลขในวงจรแสดงถึงขาของตัวอุปกรณ์ชนิดนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการพิเศษนี้เรายังใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิที่เป็นวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ด้วย ซึ่งในการนำวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์นั้นมาต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิทำให้เราสามารถลดอุณหภูมิของเขาได้โดยอัตโนมัติ โดยที่ตัววงจรนั้นเราจะใช้ตัวมอเตอร์รอบซ้ำกับเฟืองเป็นตัวเปลี่ยนค่าความต้านทาน เมื่อความต้านทานเปลี่ยนไปมีผลทำให้การจ่ายค่าความต่างศักย์ของวงจรที่มีให้กับเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นเปลี่ยนไปด้วยมีผลทำให้กระแสจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิเปลี่ยนไป โดยที่การจ่ายความต่างศักย์จะมีมาก หรือ น้อยนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการเปลี่ยนไปของค่าความต้านทาน ซึ่งค่าความต้านทานนั้นจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของเฟืองที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 7.4 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลดลงของอุณหภูมิเตา

7.2 การเตรียมผลึก

ผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้เตรียมแบบโคเรชันนัล ฟริชซึ่งเป็นผลึกสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นนี้เตรียมตามสัดส่วนสโตยอริโอเมตริ หลังจากที่ได้เตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำได้แล้วนั้นเราจะนำไปทำการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างสารด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ในขั้นสุดท้ายเป็นการทำฟิล์มบางจากผลึกสารกึ่งตัวที่เตรียมได้ โดยฟิล์มบางที่ได้นี้ยังนำไปทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นแบบรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของ $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ ผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่ทำการเตรียมขึ้นนี้มีอัตราส่วนเป็นไปตามสัดส่วนสโตยทรีโอเมตตรี โดยไม่มีการเพิ่มหรือลดธาตุที่เป็นส่วนประกอบ

7.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผลึก

- เตาหลอมสาร

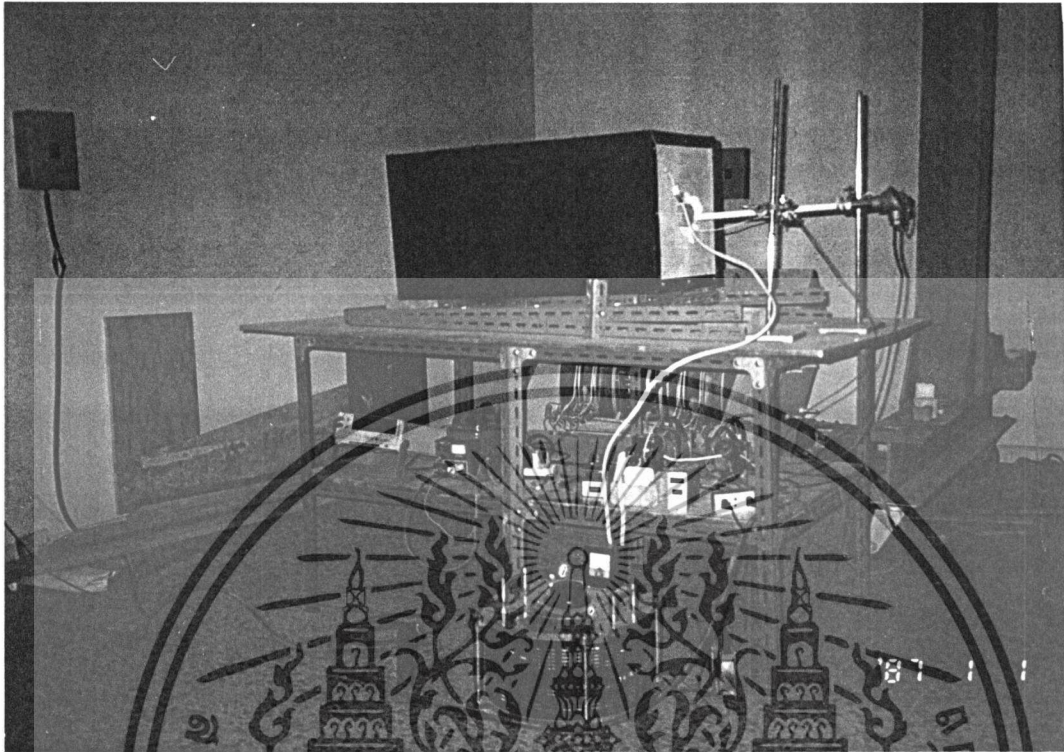
เตาที่ใช้ในการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 เป็นเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยว ซึ่งเป็นชนิดท่อ โดยทำการสร้างขึ้นเอง ประกอบด้วย ขดลวดนำความร้อนแคนดัล (kantal wire) ถูกยึดติดอยู่ภายในท่อปูน ท่อนี้บรรจุอยู่ในกล่องอลูมิเนียม โดยมีเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) เป็นฉนวนกันความร้อนบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อกับผนังกล่องอลูมิเนียม

- ระบบควบคุมและตั้งอุณหภูมิของเตา

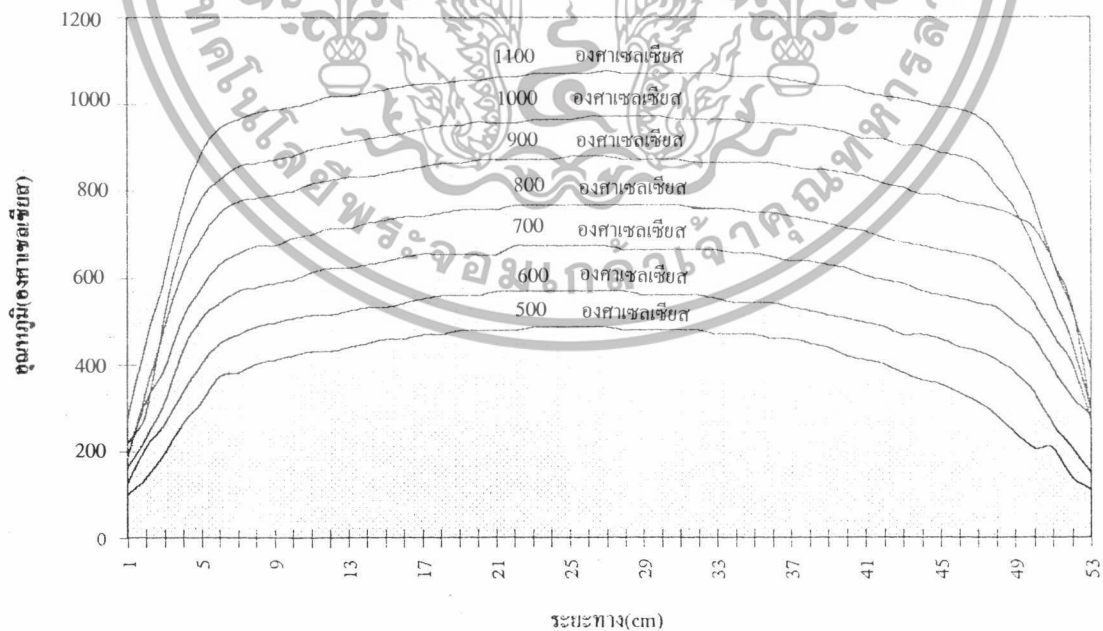
เตาหลอมนี้ใช้กับระบบไฟ 220 โวลต์ แต่เนื่องจากขดลวดนำความร้อนแคนดัลมีความต้านทานต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลวดมีมากจนทำให้ลวดขาด จึงจำเป็นต้องอาศัยแวลวี่แอค (variac) เพื่อสามารถที่จะเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ตกคร่อมลวดในเตาได้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ตามที่ได้ตั้งไว้ ค่าของอุณหภูมิของเตาจะถูกอ่านผ่านทางเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิโดยทำการสอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าทางด้านหัวเตาตรงกึ่งกลางเตา แล้วทำการต่อวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์เข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิด้วย เพื่อทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เตาได้โดยอัตโนมัติตามรูปที่ 7.3

การเปลี่ยนค่าความต้านทานจะเปลี่ยนไปด้วยการจับเคลื่อนของมอเตอร์รอบซ้ำ วงจรไฟฟ้าจะป้อนความต่างศักย์ให้กับเทอร์โมคัปเปิลอย่างช้า ๆ เช่นกัน เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะปล่อยกระแสเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่อ่านได้จากความต่างศักย์ที่เทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาหลอมโซลาร์เดี่ยวพร้อมทั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 7.6 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโดยตั้งอุณหภูมิกกลางเตาไว้ที่ค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 การเตรียมหลอดแก้วควอทซ์เพื่อบรรจุสาร

หลอดแก้วควอทซ์ที่จะนำไปบรรจุสารจะต้องมีความสะอาดเพียงพอ เพื่อขจัดสิ่งเจือปนที่ติดกับหลอดนั้นซึ่งอาจจะเกิดการปนเปื้อนกับสารกึ่งตัวนำที่เราทำการเตรียมได้ และขังส่งผลทำให้สารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะติดกับผนังหลอดซึ่งทำให้สารกึ่งตัวนำแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขณะที่เราต้องทำการทูปหลอด การทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์มีหลายวิธีด้วยกันแต่เราจะเลือกเฉพาะวิธีที่เหมาะสมเท่านั้นมาใช้งาน ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ล้างหลอดแก้วควอทซ์ด้วยน้ำกลั่น เพื่อขจัดฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกออกให้หมด
2. ใส่สารละลายกรดระหว่าง HCl กับ HNO₃ ในอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตรผสมกับน้ำอีก 10 ส่วน แช่ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
3. ในกรณีที่แก้วมีสิ่งสกปรกเกาะติดแน่น ควรจะทำการล้างด้วยกรดกัดแก้วเจือจางโดยผสมกับกรดกัดแก้วในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร แช่ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
4. ทำการล้างสารละลายกรดออกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water) ล้างจนแน่ใจว่าไม่มีกรดหลงเหลืออยู่
5. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน หรือ นำไปใส่ในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
6. หุ้มหลอดแก้วควอทซ์ด้วยฟอยล์ (foil) เพื่อป้องกันฝุ่นละอองก่อนที่จะบรรจุสารลงไป

7.2.3 การหึ่งและบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วควอทซ์

นำธาตุ Cu , In , Se ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาทำการชั่งน้ำหนักให้ได้ขนาดตามที่ได้คำนวณไว้ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ในการบรรจุธาตุลงไปในหลอดแก้วควอทซ์นั้น เราควรใส่ซิลิเนียมลงไปก่อนแล้วตามด้วยธาตุอินเดียมและทองแดง ตามลำดับ เพื่อให้ทั้งอินเดียมและซิลิเนียมอยู่ห่างจากคอคอดมากที่สุด เพราะซิลิเนียมมีจุดเดือดต่ำระเหยง่ายเมื่อได้รับความร้อนในขณะที่หลอมปิดคอคอดด้วยไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน

วิธีการคำนวณหามวลของธาตุ

จากตาราง มวลอะตอมของธาตุ Cu = 63.546

มวลอะตอมของธาตุ In = 114.82

มวลอะตอมของธาตุ Se = 78.96

มวลอะตอมของสารประกอบ CuInSe₂ = 336.286

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของสารประกอบ CuInSe_2 ที่ต้องการคือ 15 กรัม ดังนั้น น้ำหนักของธาตุแต่ละธาตุสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุ}}{\text{มวลอะตอมของธาตุ}} = \frac{\text{น้ำหนักของสารประกอบ } \text{CuInSe}_2}{\text{มวลอะตอมของสารประกอบ } \text{CuInSe}_2}$$

จากการคำนวณ

น้ำหนักของ Cu = 2.834(4) กรัม

น้ำหนักของ In = 5.121(5) กรัม

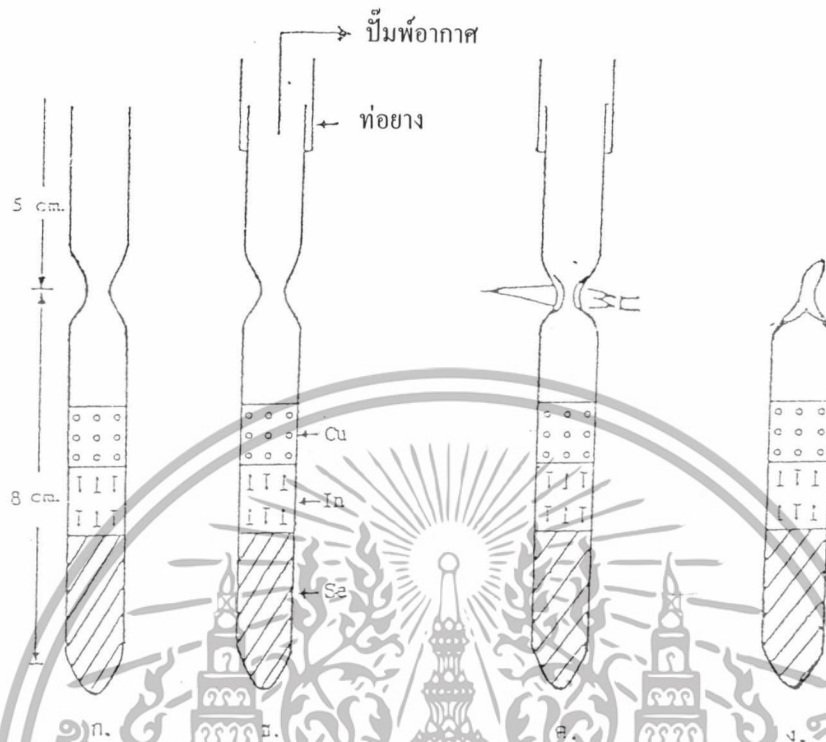
น้ำหนักของ Se = 7.044(0) กรัม

ตาราง 7.1 แสดงน้ำหนักธาตุต่าง ๆ ที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ของ CuInSe_2

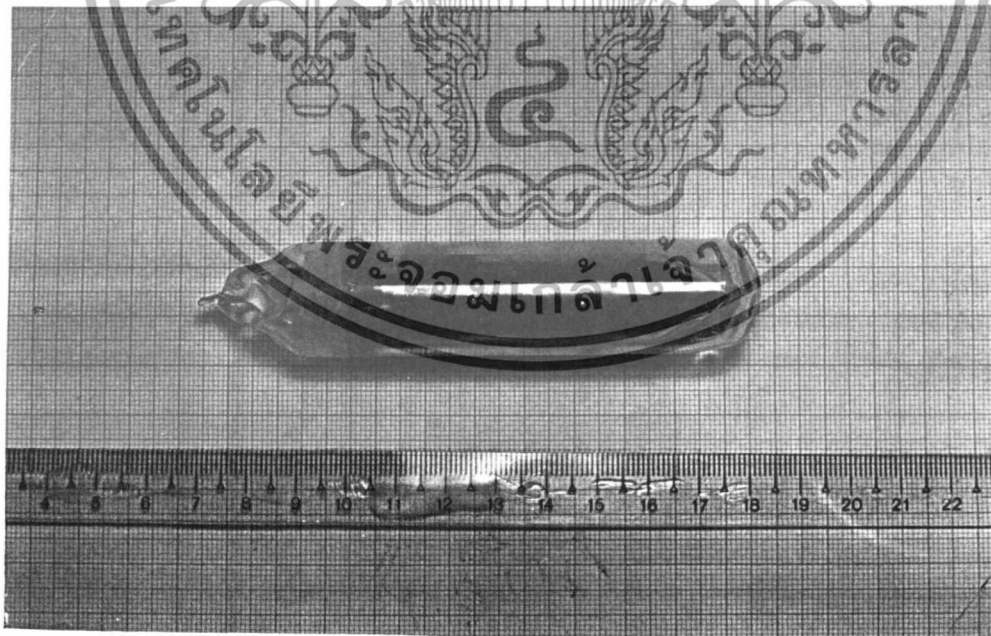
ธาตุ	ความบริสุทธิ์ (%)	น้ำหนักอะตอม	น้ำหนักธาตุ (กรัม)	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ลักษณะของธาตุ
Cu	99.9999	63.546	2.8344	1083	2567	เป็นก้อนโลหะ แข็งเหนียว เป็นมันวาว
In	99.9999	114.82	5.1215	156.4	2050	เป็นก้อนโลหะ อ่อนเหนียว สีbronซ์
Se	99.9999	78.960	7.0440	217	688	เป็นก้อนเล็ก ๆ เปราะ สีน้ำตาลดำ

หลังจากที่ทำการบรรจุธาตุลงในหลอดแก้วเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการหลอมปิดแก้วควอทซ์รายละเอียดเกี่ยวกับการหลอมปิดแก้วควอทซ์นั้นสามารถหาอ่านได้จากเอกสารอ้างอิงลำดับที่ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.7 แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ก่อนการหลอมปิดแก้วควอทซ์



รูป 7.8 แสดงหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุธาตุ Cu , In และ Se

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.4 ขั้นตอนในการเตรียมผลึก

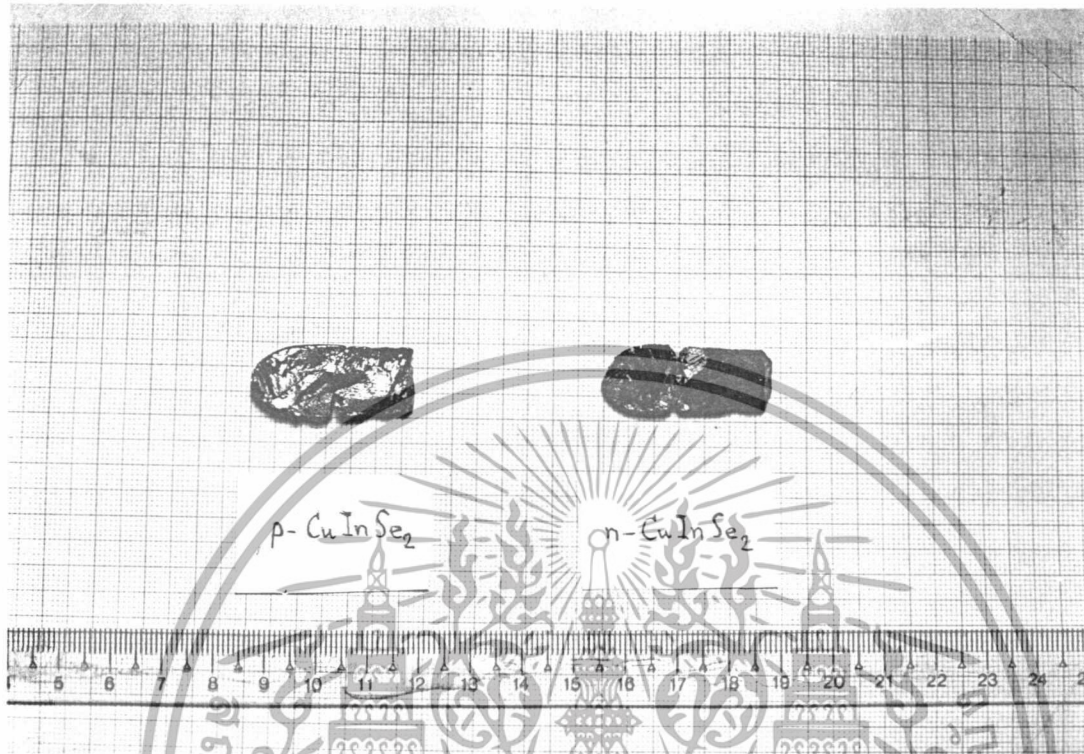
ในการวิจัยครั้งนี้เราเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. นำเอาหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุสารไว้เรียบร้อยแล้ว นำไปวางไว้ในบริเวณกลางเตา
2. อุดปลายท่อของเตาด้วยอิฐทนไฟ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเตาซึ่งเย็นกว่าไหลผ่านเข้าในเตา และป้องกันไม่ให้อุณหภูมิหลุดออกมานอกเตาได้ในกรณีที่หลอดเกิดการแตก
3. ทำการเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้พร้อม เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
4. เริ่มทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาอย่างช้า ๆ โดยตั้งอุณหภูมิให้เพิ่ม 50 องศาเซลเซียสทุก ๆ ชั่วโมง จนถึง 200 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 10 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึง 1150 องศาเซลเซียส ทิ้งระยะไว้ประมาณ 10 ชั่วโมง ในระหว่างนี้ให้ทำการเย็บหลอดแก้วควอทซ์ให้กลิ้งไปกลิ้งมาเป็นระยะ ๆ เพื่อช่วยให้สารหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน
6. ทำการลดอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ด้วยอัตราดังนี้
 - ในช่วง 1008 - 950 องศาเซลเซียส ลดด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
 - ในช่วง 950 - 850 องศาเซลเซียส ลดด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
 - ในช่วง 850 - 750 องศาเซลเซียส ลดด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
 - ในช่วง 750 - 300 องศาเซลเซียส ลดด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
 - ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ให้ทำการปิดเตา

7.2.5 ลักษณะของผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา

ในขณะที่ทำการทดลองนั้นไม่มีการแตกของหลอดแก้ว หรือ หลอดแตกร้าวเนื่องจากความดันไอกภายในหลอดแก้วควอทซ์ สารตัวอย่างที่เตรียมได้จะมีขนาดใหญ่เป็นแท่งครึ่งทรงกระบอกสีดำ แสดงดังรูปที่ 7.9 ผิวเรียบด้านสะท้อนแสงได้น้อย ไม่มีส่วนใดของสารตัวอย่างติดกับผิวหลอดแก้วควอทซ์เลย มีรอยแตกให้เห็นบ้างเล็กน้อย บดเป็นผงได้ง่าย จากการเตรียมสาร 2 หลอดนั้นผลึกที่ได้จะมีสภาพนำไฟฟ้าคนละชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9 แสดงขนาดของผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศา

7.3 การเตรียมฟิล์มบาง CuInSe_2

ในการเตรียมสารประกอบ CuInSe_2 ทำโดยใช้การระเหยสารในระบบสุญญากาศ โดยสารที่นำมาใช้เป็นผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นเองด้วยวิธีไครเรกซ์นั่นต์ ฟริชชิง ในการระเหยสาร เพื่อให้สารเกาะติดกับแผ่นรองรับซึ่งเราใช้กระจกสไลด์ให้ดียิ่งขึ้นนั้นเราต้องทำการกำหนดอุณหภูมิให้กับกระจกสไลด์

7.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม

- ระบบสุญญากาศ

ในการทำระบบให้เป็นสุญญากาศนั้น เราใช้ปั๊มโรตารีและดิฟิวชั่น โดยที่ปั๊มโรตารีนั้นจะทำการดูดอากาศภายในครอบแก้วจนได้ระดับ 10^{-2} มิลลิบาร์ (mbar) ซึ่งในตอนนี้หัววัดความดันที่ใช้เป็นชนิดพิรานี (pirani gage) เมื่อปั๊มโรตารีทำระดับความดันได้ 10^{-2} มิลลิบาร์ แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

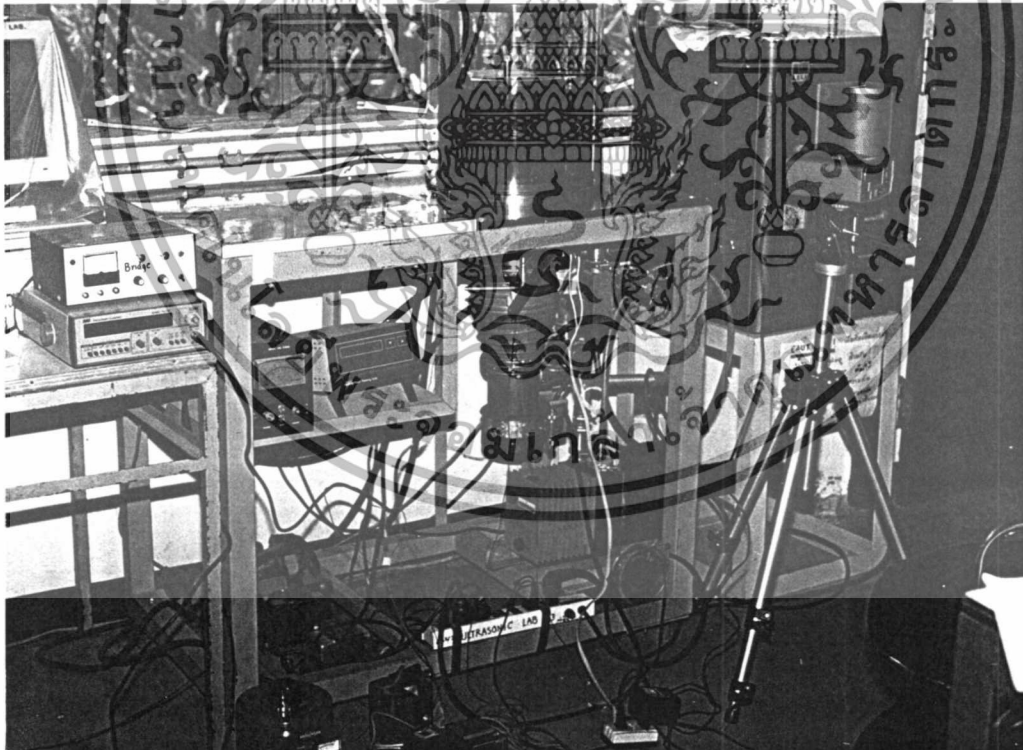
ต่อไป เราต้องทำความดันของระบบให้ได้ 10^{-5} มิลลิบาร์ ซึ่งหัววัดที่ใช้อ่านความดันจะเป็น เกจเพ็นนิ่ง (penning gage)

- แวริแอก

กระแสไฟฟ้าที่ให้กับโบทและแผ่นให้ความร้อนนั้นเราใช้แวริแอกโดยที่แวริแอกที่ให้กับ โบท และแผ่นความร้อนนั้นเป็นคณลัตว เนื่องจากว่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับโบทนั้นมีค่าสูงมากกว่าที่จ่ายให้กับแผ่นความร้อน

- ระบบควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

ระบบควบคุมนี้เราใช้วงจรเดียวกับที่เราใช้ควบคุมอุณหภูมิของเราในการปลูกผลึก



รูปที่ 7.10 แสดงระบบสุญญากาศสำหรับการเตรียมฟิล์มในโรงงานพิเศษนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.2 ขั้นตอนในการเตรียมกระจกสไลด์

ก่อนที่จะนำกระจกสไลด์ไปทำการเคลือบสารนั้นเราต้องทำการเตรียมกระจกเสียก่อน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการตัดกระจกสไลด์ให้มีขนาดพอดีกับตัวระบายความร้อน (heat sink) ในรูปที่ 4.3
2. ทำการล้างด้วยผงซักฟอกให้สะอาด
3. หลังจากนั้นนำมาแช่ด้วยกรด HCl:HNO₃ ในอัตราส่วน 3:1 แล้วผสมกับน้ำ DI อีก 10 ส่วน โดยแช่ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
4. ทำการแช่ด้วย น้ำ DI ประมาณ 30 นาที เพื่อชำระล้างกรดออกไป
5. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สใน โทเจน
6. ทำการอบกระจกสไลด์ด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
7. รอให้เย็นแล้วเราก็สามารถนำไปใช้งานได้

7.3.3 การระเหยสารให้เกาะติดบนกระจกสไลด์

ระบบการระเหยสารแสดงดังรูปที่ 7.10 โดยมีขั้นตอนในการระเหยสารดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยพยายามกำจัดฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบออกให้มากที่สุด
2. ทำการติดตั้งระบบต่าง ๆ ภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำ CuInSe₂ ซึ่งทำการบดแล้ว (บดให้มีขนาดพอที่จะใส่ลงในโบทได้) นำมาใส่ลงในโบททั้งสแตนพอลประมาณ นำกระจกสไลด์พร้อมกับหน้ากาก (mask) ซึ่งทำโดยใช้แผ่นทองแดงเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ ปิดครอบแก้ว (chamber) ให้เรียบร้อยแล้วปิดชัตเตอร์
4. ทำการสูบอากาศออกจนความดันลดลงเป็น 10⁻² มิลลิบาร์ ด้วยปั๊มพัลโรตารี (rotary pump)
5. ทำการเสียบปลั๊กของปั๊มดิฟฟิวชัน (diffusion pump) รอสักครู่เพื่อให้ น้ำมันในปั๊มเดือดเสียก่อน แล้วจึงทำการปล่อยน้ำเย็น 5 องศาเซลเซียส มาหล่อเลี้ยง
6. รอสักครู่จนสังเกตเห็นว่ามีไอน้ำเกาะอยู่บนขวดของปั๊มดิฟฟิวชัน แล้วจึงทำการปิดปั๊มโรตารี โดยทำการเปิดปั๊มดิฟฟิวชันทันที ทำการสูบอากาศออกจนความดันลดลงต่ำกว่า 5 × 10⁻⁵ มิลลิบาร์
7. เสียบปลั๊กหม้อแปลงที่ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิของกระจกสไลด์รอกจนกระทั่งได้ อุณหภูมิของแผ่นกระจกสไลด์ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

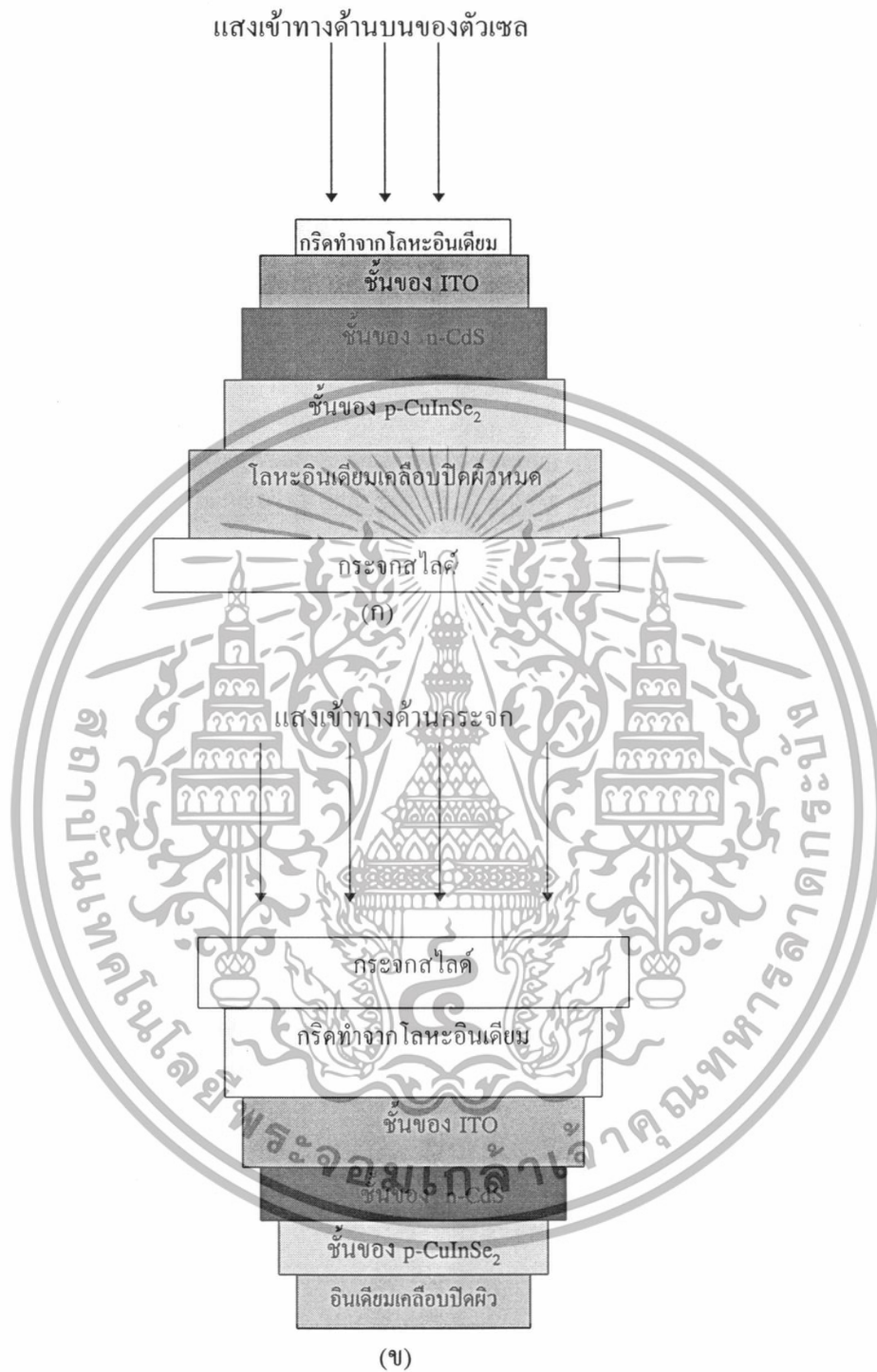
8. เลียบปลั๊กหม้อแปลงที่ใช้กับโบท สังเกตจนสารในโบทหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงเริ่มทำการระเหยสารมายังกระจกสไลด์ โดยทำการเปิดชัตเตอร์
9. พอสังเกตเห็นว่าสารในโบทระเหยหมดแล้ว ให้ทำการถอดปลั๊กหม้อแปลงของโบท และแผ่นกระจกสไลด์ออก
10. รอจนกระทั่งระบบเย็นตัว โดยทั่วไปประมาณ 1 ชั่วโมง
11. ทำการปิดปั๊มพีดีพีวชัน และปั๊มโพโรตารี
จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น เราจะได้ฟิล์มของ CuInSe_2 มา 1 ชั้น เมื่อทำการระเหยสารชนิดต่อไปให้ทำดังนี้
12. เปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปในครอบแก้ว
13. เปิดครอบแก้วออกแล้วทำความสะอาดและระบบ โดยทั่ว ๆ ไปเราใช้เอทานอล
14. เปลี่ยนโบทเป็นโบทของสารตัวต่อไปที่เราต้องการระเหย ใส่สารลงไปพอประมาณ ใช้กระจกสไลด์แผ่นเดิมที่ทำการเคลือบ CuInSe_2 แล้ว ปิดครอบแก้วพร้อมทั้ง ปิดชัตเตอร์ด้วย ทำซ้ำตามข้อ 4 - 12 สำหรับชั้นต่อไปก็ทำเช่นเดียวกัน

สำหรับชั้นสารที่เป็นของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยชั้นของ

- In (อินเดียม)
- ITO (อินเดียมทินออกไซด์)
- CdS (แคดเมียมซัลไฟด์) ชนิดเอ็น
- CuInSe_2 (คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไนด์) ชนิดพี
- In (อินเดียม)

ในโครงการพิเศษนี้เราได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกัน 2 แบบ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแง่ทิศทางการเข้าของแสง คือ แบบที่แสงเข้าทางด้านกระจก และแบบที่แสงเข้าทางด้านบนของตัวเซลล์ แสดงดังรูปที่ 7.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11 แสดงการสร้างชั้นเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ

(ก) แสงเข้าทางด้านขั้วไฟฟ้า

(ข) แสงเข้าทางด้านกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3.4 การแอนนีสลแผ่นฟิล์ม

เพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมขึ้นครั้งนี้ เราเลือกใช้โลหะอินเดียม (In) ทำเป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากโลหะเหล่านี้มักใช้ทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำ , หาได้ง่าย , เหมาะสำหรับการเริ่มต้นในการศึกษา และที่สำคัญโลหะอินเดียมยังราคาถูก โดยทั่วไปก่อนที่จะนำ In มาใช้งานควรทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยอะซิโตน หลาย ๆ ครั้ง แล้วจึงนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อลดให้ติดบนชิ้นผลึกที่เตรียมผิวหน้าผลึกให้สะอาดโดยการกัดด้วยสารละลายเคมี ขึ้นต่อไป คือ นำเอาชิ้นผลึกหรือบางครั้ง เรียกว่าชิ้นสารที่กัดด้วย In ติดบนผิวหน้าเรียบรอยเหล่านี้ไปแอนนีสลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ไหลถ่ายเทตลอดเวลา

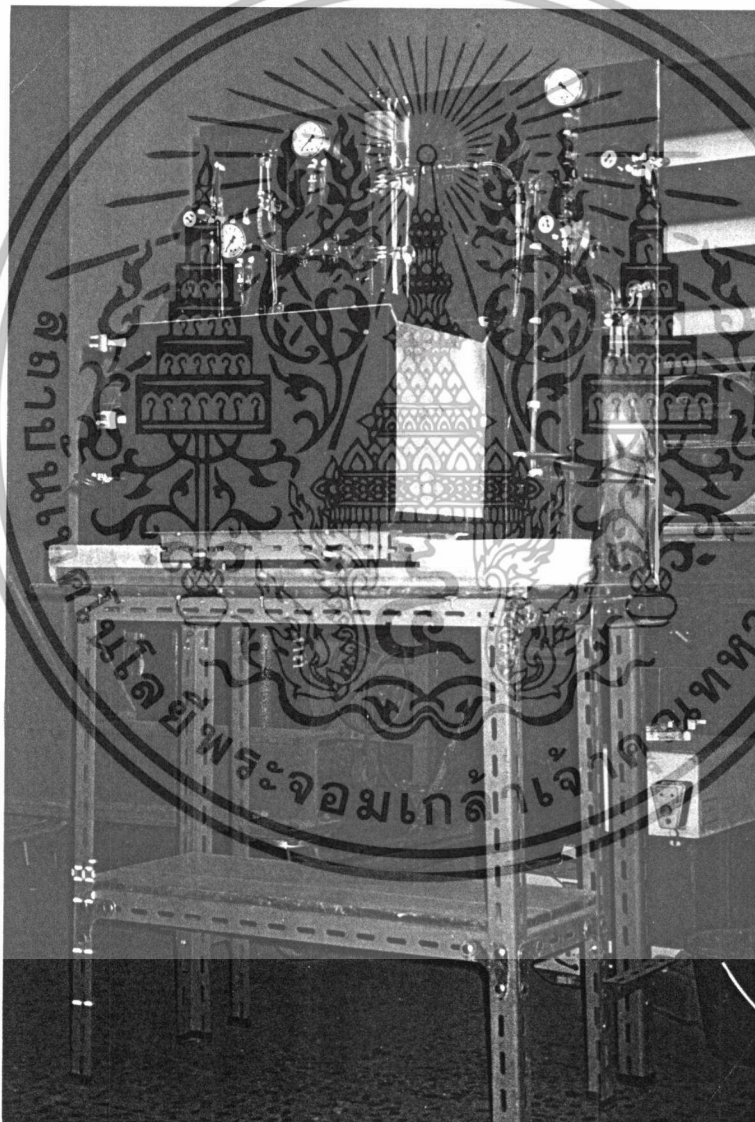
ที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นวิธีการทำชิ้นสารที่เป็นก้อนผลึกมาทำเป็นรอยต่อโอห์มมิก แต่ในโครงการพิเศษนี้ เราจะนำฟิล์มบางของ CuInSe_2 มาทำรอยต่อโอห์มมิกได้โดยการทำการระเหยอินเดียมในระบบสุญญากาศ โดยให้อินเดียมนั้นเคลือบอยู่บนฟิล์มบางของ CuInSe_2 ที่ทำการระเหยก่อนหน้านี้ หลังจากทำการระเหยเสร็จแล้ว เพื่อให้ฟิล์มบาง CuInSe_2 กับโลหะอินเดียมเป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดีนั้นเราก็ต้องทำการแอนนีสลเสียก่อน

เตาที่ใช้แอนนีสลประกอบไปด้วยตัวเตาซึ่งสามารถเลื่อนไปบนรางคู่ขนาน และมีท่อแก้วควอทซ์ยาวประมาณ 50 เซนติเมตร สอดผ่านเข้าไปในเตา ปิดปลายทั้งสองข้างของท่อแก้วควอทซ์ด้วยที่จับที่ติดกับแท่นยึดให้ท่อแก้วควอทซ์อยู่นิ่ง นำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบแก๊สเพื่อให้แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ไหลเข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ได้ทางปลายด้านหนึ่ง และออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง นำชิ้นสารใส่เข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ทำการดูดเอาอากาศภายในท่อแก้วควอทซ์ออก (evacuate) ทางปั๊มโรตารี (rotary pump) และ บรรจุ (refill) แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปแทนที่ทำการดูดเอาอากาศออก และบรรจุเข้าแทนที่กระทำเช่นนี้ประมาณ 10 ครั้ง เพื่อให้แก๊สออกซิเจนเหลือน้อยที่สุด หลังจากนั้นจึงปล่อยแก๊สไนโตรเจนไหลเข้าและปล่อยออกทิ้งด้วยอัตรา 1 ฟองอากาศต่อวินาที โดยปรับให้ความดันภายในท่อแก้วควอทซ์มากกว่าความดันปกติเล็กน้อย ที่ทำเช่นนี้เพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกรั่ว (leak) ตามข้อต่อ (connector) เข้าสู่ระบบ อีกทั้งขณะที่อุณหภูมิของเตาสูงขึ้นจะทำให้ความดันของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ในท่อแก้วควอทซ์เพิ่มขึ้นอันอาจทำให้ตัวคับปลิง (O-ring vacuum coupling) ที่ปิดปลายทั้งสองของท่อหลุดออกจากท่อแก้วควอทซ์ได้ ลำดับต่อมาคือ เลื่อนเตาให้ห่างจากชิ้นสารมากที่สุด แล้วจึงปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ตั้งอุณหภูมิให้กับเครื่องตั้งอุณหภูมิ เพื่อปรับให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้นเป็นระยะจนถึง 500 องศาเซลเซียส ปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้เตาอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนแล้วจึงเลื่อนเตาไป เพื่อให้ชิ้นสารอยู่ที่ตำแหน่งกลางเตา แอนนีสลชิ้นสารเป็นเวลานาน 20 นาที จึงหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

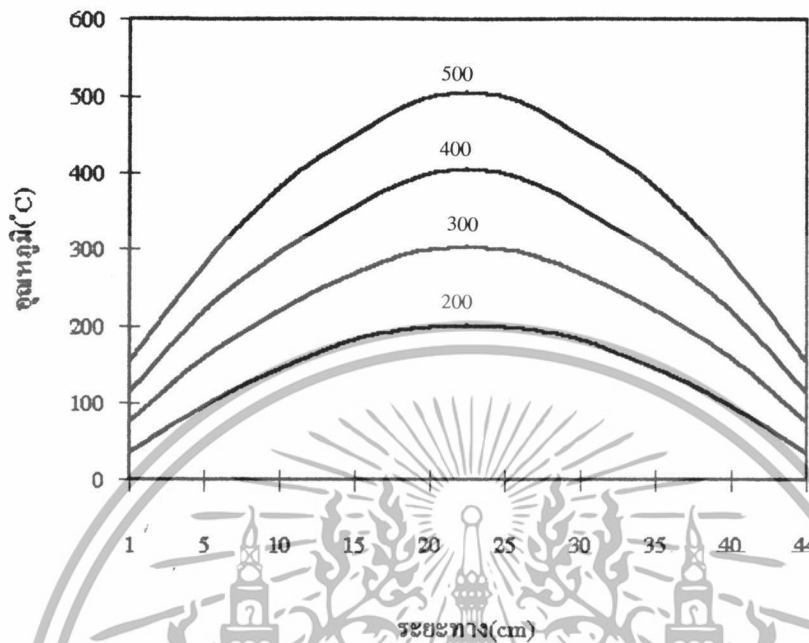
จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตาปล่อยให้เตาค่อย ๆ เย็นลงจึงสามารถนำเอาชิ้นสารออกมาทดลองในขั้นต่อไป

ผิวของชิ้นสารที่ได้จากการแอนนีสแล้วจะเป็นฝ้า ไม่เรียบ ไม่สะท้อนแสงเหมือนก่อนที่จะแอนนีส เนื่องจากว่ามีส่วนประกอบ (component) บางอย่างหลุดออกมาจากผิวของสารกึ่งตัวนำ เช่น Se_2 และ In_2Se [11] ในการเคลือบอินเดียมลงบนฟิล์ม CuInSe_2 ต้องมีความหนามาก สักหน่อย และ ในระหว่างการวัดความต้านทานนั้นต้องระวังให้มาก เพราะว่าฟิล์มบางโดยทั่วไปนั้นจะเสียหายได้ง่าย



รูป 7.12 แสดงระบบการแอนนีสที่ใช้ในการแอนนีสฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาที่ใช้การแอนนิล โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 200,300,400,500 องศาเซลเซียส

7.3.5 ลักษณะของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมได้ในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นได้มีสีออกเทา ๆ แต่ถ้าในระบบสุญญากาศมีสิ่งเจือปน อย่างเช่น CdS ปนอยู่ฟิล์มที่ได้ก็จะมีสีออกเหลืองแกมเทาดำ ซึ่งขนาดความกว้างของแผ่นฟิล์มนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของหน้ากาก โดยฟิล์มที่ทำการเคลือบนั้นจะติดกับแผ่นสไลด์ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระจกสไลด์

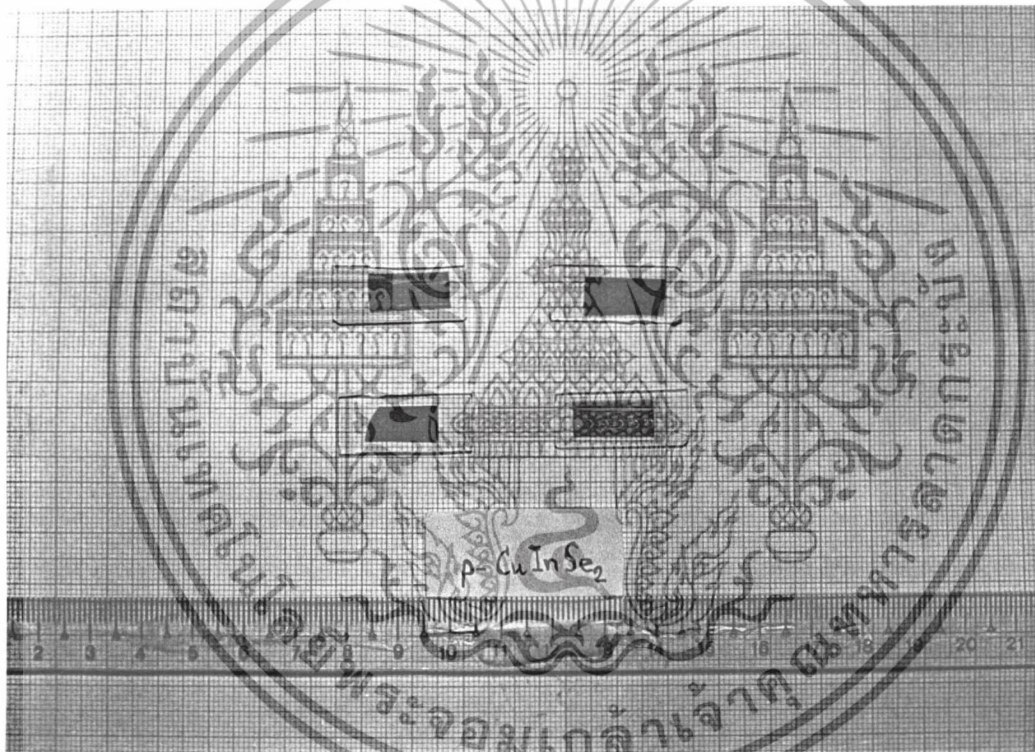
เราทำการเตรียมฟิล์มบางขึ้นภายใต้เงื่อนไขของกระจกสไลด์ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- กระจกสไลด์ที่ไม่ได้ทำการอบและไม่มีรอยขีดข่วน
- กระจกสไลด์ที่ไม่ได้ทำการอบและมีรอยขีดข่วน
- กระจกสไลด์ที่ทำการอบและไม่มีรอยขีดข่วน
- กระจกสไลด์ที่ทำการอบและมีรอยขีดข่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ในการอบนี้เราทำการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ส่วนรอยขีดข่วนนั้นเราทำก่อนที่จะนำไปอบ และเราพบว่าหลังจากที่ทำการอบแล้วขนาดของรอยขีดข่วนบนกระจกสไลด์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

หลังจากการระเหยฟิล์มในทุกเงื่อนไขแล้วเราพบว่า ฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้ทำการอบนั้นจะติดดีกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ทำการอบ และ ฟิล์มที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ที่ไม่ได้ทำการขีดข่วนจะติดดีกว่าฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ที่มีรอยขีดข่วน จากเงื่อนไขของกระจกสไลด์ทั้งหมดนั้นกระจกที่ไม่มีรอยขีดข่วนและทำการอบนั้นฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะของฟิล์มที่ดีกว่าในกรณีอื่น ๆ โดยที่จะมีความหนาแน่นมากกว่า , เรียบกว่า และติดแน่นกับแผ่นกระจกกว่า



รูปที่ 7.14 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการทดลอง

7.4 ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

ถ้าผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ที่เตรียมได้อยู่ในภาวะที่สมดุลแล้ว เราสามารถหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกได้จากวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบของผลึกผง (powder) จะถูกบันทึกลงบนฟิล์ม ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กับเป้าโลหะที่เรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้โดยทั่วไปจะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น 1.541(8) อังสตรอม (ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใช้ได้กับฟิล์มบาง ส่วนก้อนสารที่เป็นผลึก CuInSe_2 นั้นเราใช้ความยาวคลื่น 1.540(5) อังสตรอม จากการวิเคราะห์ความเข้มของเส้นเลี้ยวเบน (diffracted lines) ที่ปรากฏบนฟิล์มเทียบกับไฟล์ (file) มาตรฐานของ CuInSe_2 ในภาคผนวก ก. จะทำให้ทราบได้ว่าเส้นเหล่านี้เลี้ยวเบนมาจากระนาบใดบ้างซึ่งสามารถที่จะนำข้อมูลนี้ไปทำการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกตามต้องการ

7.4.1 การเตรียมผลึกผง

นำเอาผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 บางส่วนมาบดให้ละเอียด และเติมผลึกผงของซิลิกอนลงไปประมาณหนึ่งในสามของผลึกผงทั้งหมด เพื่อเป็นตัวมาตรฐานสำหรับแก้ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

เมื่อเราจะทำการถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์กับแผ่นฟิล์มนั้น เราสามารถที่จะนำแผ่นฟิล์มที่ติดกับกระจกสไลด์เข้าไปวางไว้ในฐานสำหรับวางชิ้นสารในตัวเครื่องได้เลยไม่ต้องทำการบดแผ่นฟิล์ม

7.4.2 การคำนวณหาค่าคงที่ของ โครงผลึก [11]

เมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านเข้าไปในผลึกผง รังสีเอ็กซ์นี้จะเลี้ยวเบนออกมาเนื่องจากระนาบต่าง ๆ ที่เอียงทำมุมกับแนวรังสีตกกระทบเป็นมุมที่สอดคล้องกับกฎของแบรกก์ดังสมการที่ (7.1)

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (7.1)$$

สำหรับ CuInSe_2 นี้เป็นสารประกอบซาลโคไฟไรท์ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอล จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (λ) มุมของแบรกก์ (θ) ระนาบ (h,k,l) ต่าง ๆ ของผลึก และค่าคงที่ของโครงผลึก (a,c) ดังสมการที่ (7.2)

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) \quad (7.2)$$

ทำการหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนได้โดย

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{Si,cal} - \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{Si,obs} = \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} \right)_{Si} \quad (7.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{CuInSe}_2, \text{corr}} = \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{CuInSe}_2, \text{obs}} + \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{Si}} \quad (7.4)$$

เมื่อ

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{Si, cal}} \text{ คือ ค่าของ } \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right) \text{ ของซิลิกอนที่ได้จากการคำนวณ}$$

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{Si, obs}} \text{ คือ ค่าของ } \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right) \text{ ของซิลิกอนที่ได้จากการทดลอง}$$

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{CuInSe}_2, \text{corr}} \text{ คือ ค่าของ } \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right) \text{ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่ได้จากการคำนวณ}$$

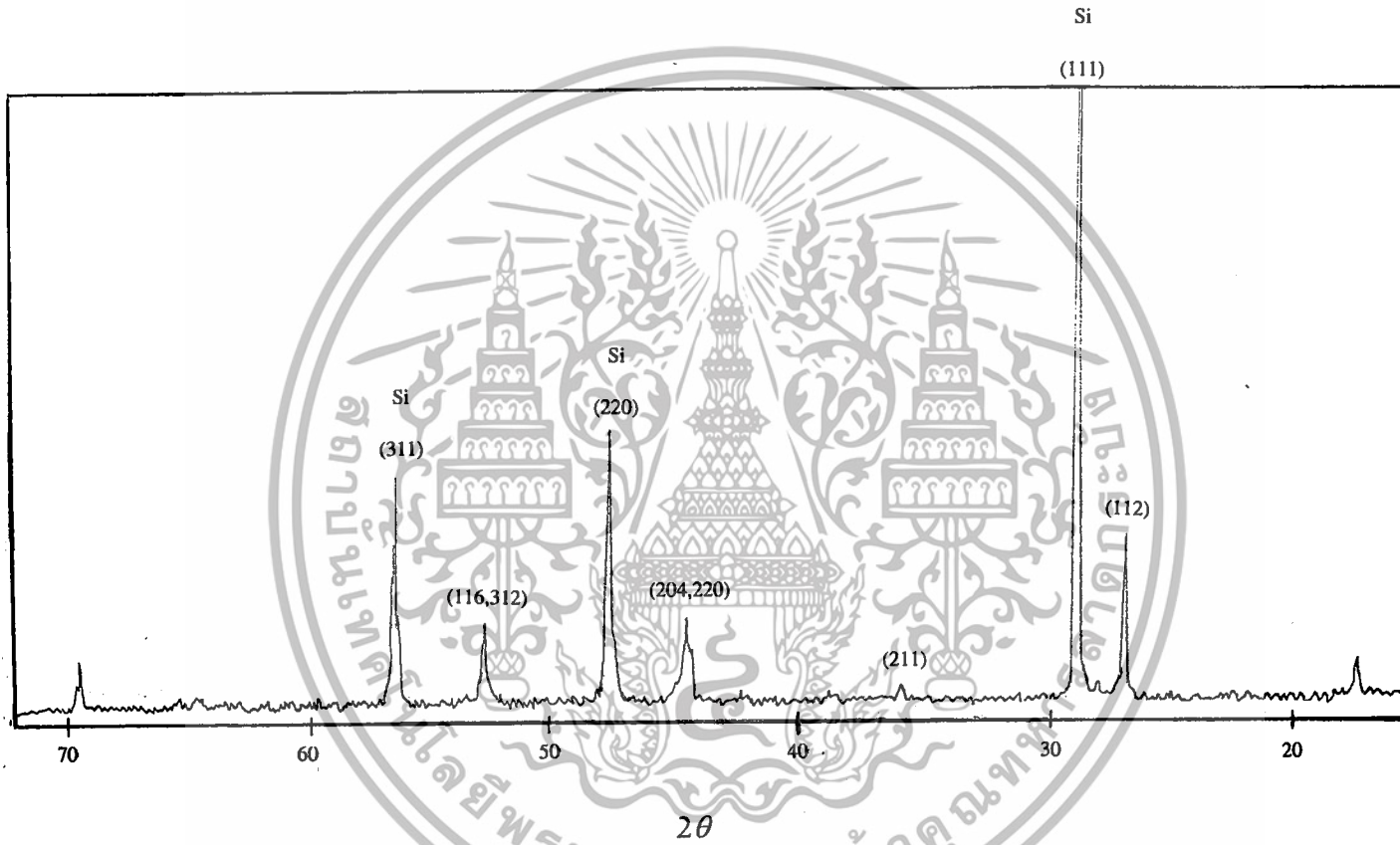
$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{\text{CuInSe}_2, \text{obs}} \text{ คือ ค่าของ } \left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right) \text{ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลอง}$$

แล้วนำสมการที่ (7.4) ไปแทนในสมการที่ (7.2) เมื่อพิจารณา hkl ที่ค่าต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

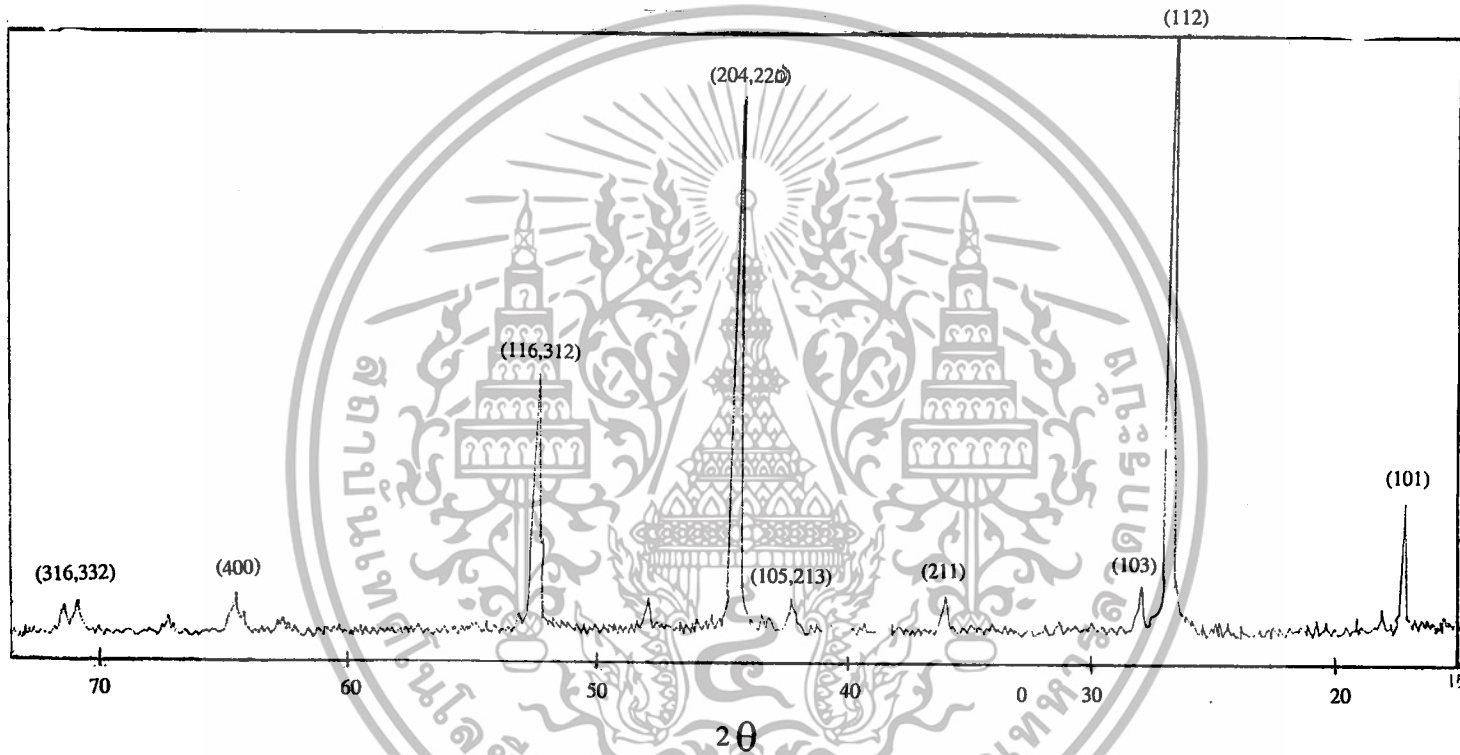
จากการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยมีธาตุซิลิกอนเป็นตัวมาตรฐาน เราสามารถหาค่าได้ a เท่ากับ 5.789(7) อังสตรอม ค่า c เท่ากับ 11.645(6) อังสตรอม และ c/a เท่ากับ 2.01 (จากกราฟรูปที่ 7.15)

จากกราฟรูปที่ 7.16 และ 7.17 นั้นเป็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึก $p\text{-CuInSe}_2$ และของ $n\text{-CuInSe}_2$ ตามลำดับ โดยเราไม่ได้ทำการใส่ธาตุซิลิกอนลงไปกับผลึกสารกึ่งตัวนำ CuInSe_2 ด้วย จากกราฟรูปที่ 7.18 และ 7.19 เป็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $p\text{-CuInSe}_2$ และ $n\text{-CuInSe}_2$ ตามลำดับ ซึ่งจากรูปกราฟรูปที่ 7.18 และ 7.19 นั้นแสดงให้เห็นได้ว่า ฟิล์มบางที่เราเตรียมได้ค่อนข้างจะมีความเป็นอะมอร์ฟัสมากสักหน่อย

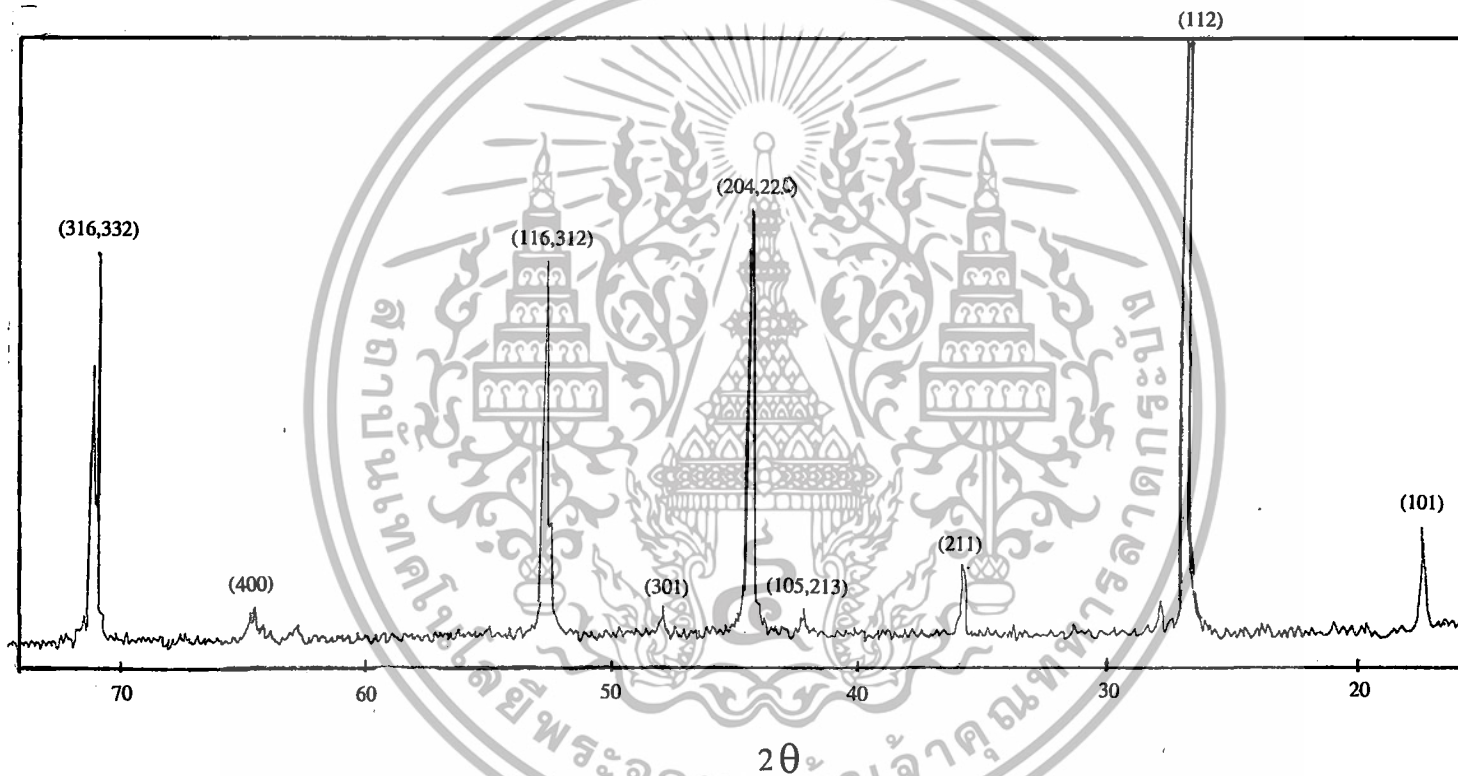
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



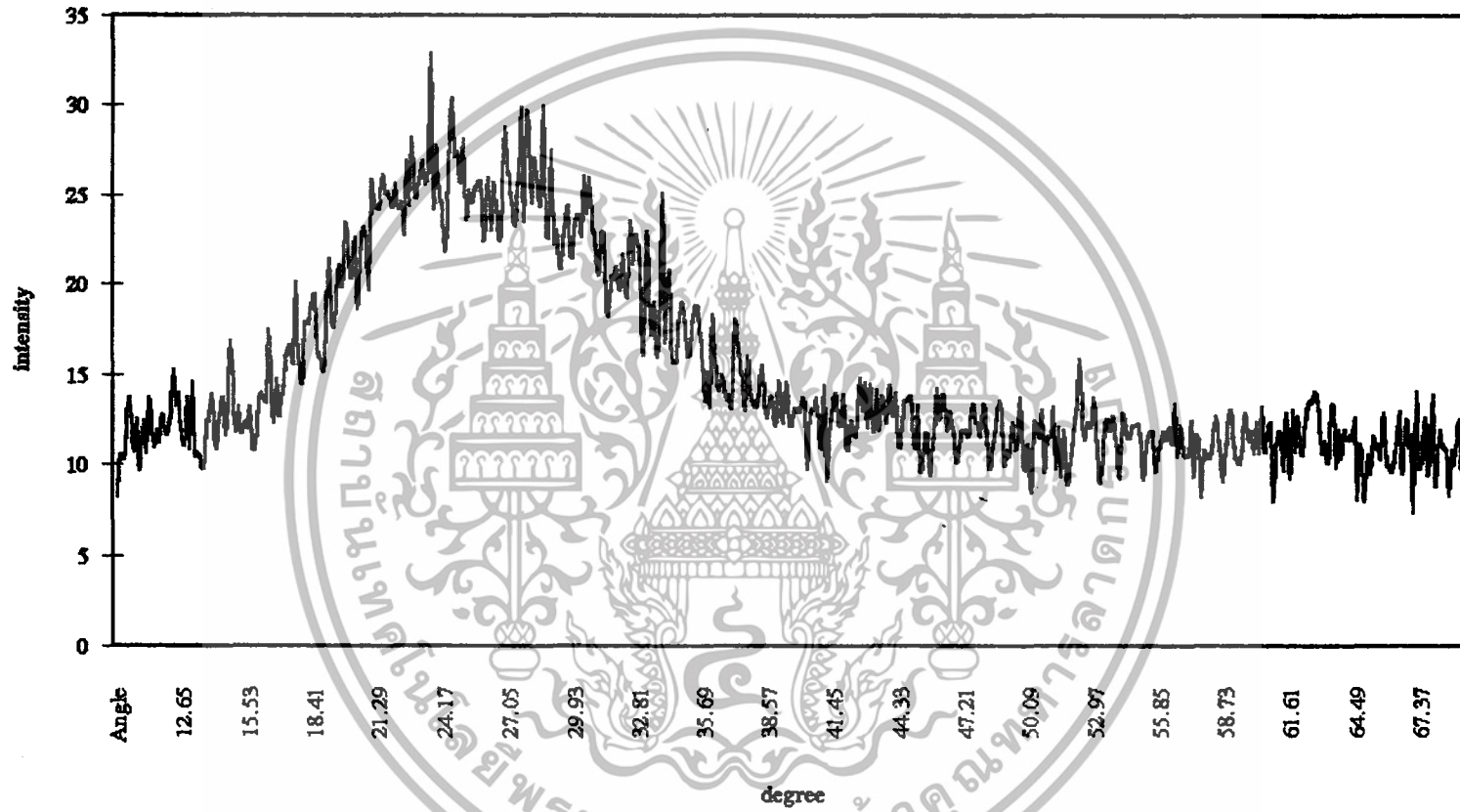
รูปที่ 7.15 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง $p\text{-CuInSe}_2$ เมื่อมีธาตุซิลิกอนเป็นตัวมาตรฐาน



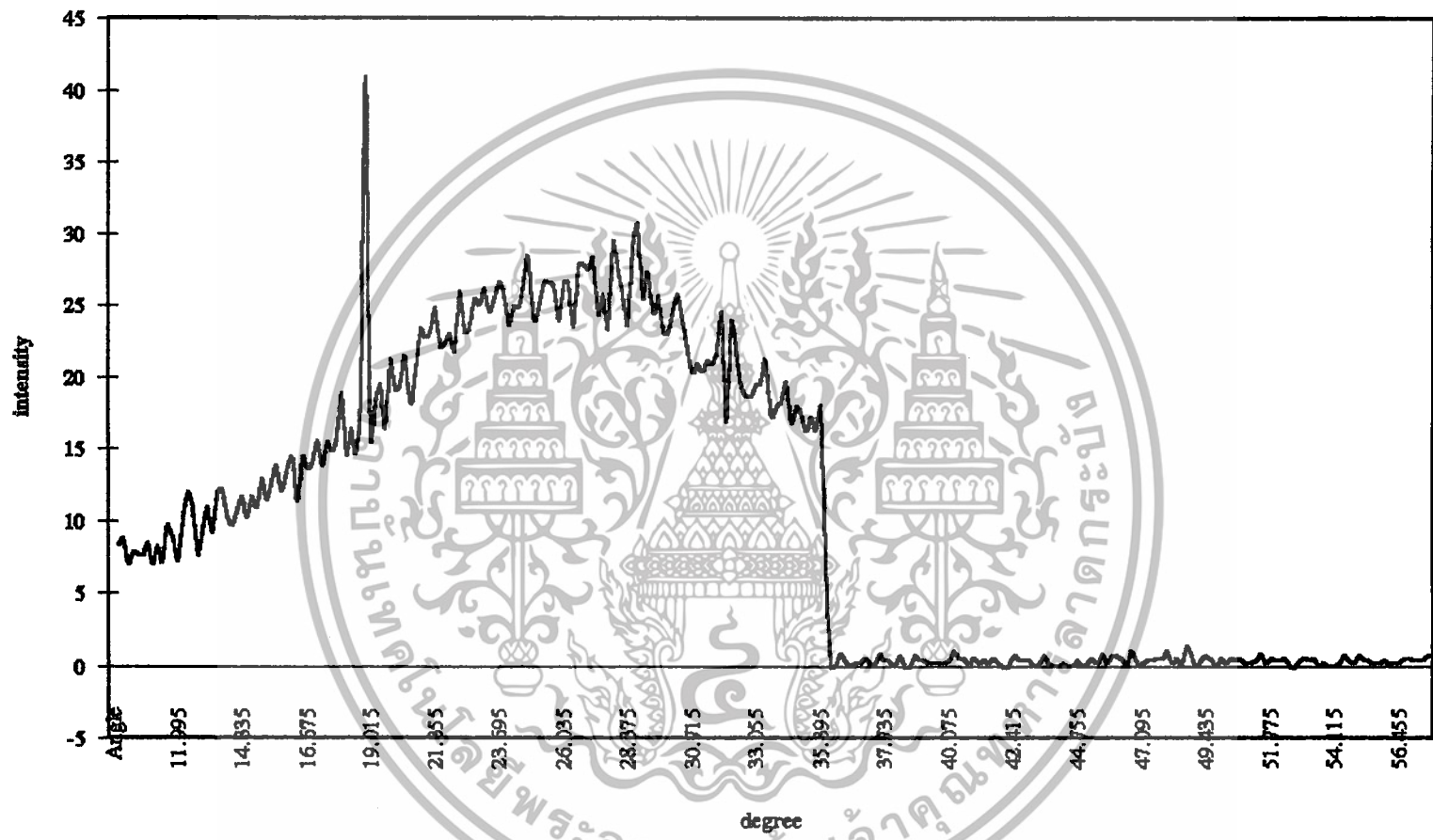
รูปที่ 7.16 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม p-CuInSe₂ เมื่อไม่มีธาตุซิลิกอนเป็นตัวมาตรฐาน



รูปที่ 7.17 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง n-CuInSe₂ เมื่อไม่มีธาตุซีลีคอนเป็นตัวมาตรฐาน



รูปที่ 7.18 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง p-CuInSe₂



รูปที่ 7.19 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง n-CuInSe₂

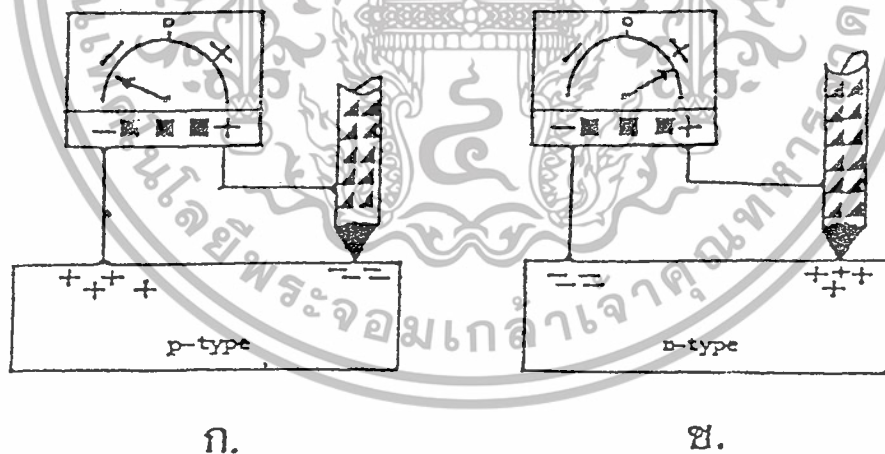
7.5 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้วัดความร้อน (hot probe method) [11]

วิธีการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้วัดความร้อนนี้ เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว ในการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าทำให้เราทราบได้ว่าสารกึ่งตัวนำที่เราเตรียมได้นั้นเป็นชนิดพีหรือเอ็น สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติมีดังนี้

1. นำผลึกสารกึ่งตัวนำที่เป็นชิ้น หรือ ก้อนผลึกที่ต้องการตรวจสอบวางบนแผ่นโลหะอลูมิเนียม
2. นำขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับแผ่นโลหะ แล้วทำการจี้หัวแร้งที่มีความร้อนลงบนชิ้นผลึก
3. โยงสายไฟจากขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับหัวแร้ง
4. หลังจากนั้นให้ทำการสังเกตเข็มของโวลต์มิเตอร์

ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิดเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับความร้อนจะแพร่กระจายมายังขั้วที่เย็นกว่า

ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิดพี เนื่องจากโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายมายังขั้วที่เย็นกว่า



รูปที่ 7.20 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีชี้วัดความร้อน

ในการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางเราสามารถทำได้เช่นเดียวกับตัวผลึก แต่ที่ต้องมีความระมัดระวังมากสักหน่อย เพราะว่าการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้ากับฟิล์มนั้นเราต้อง

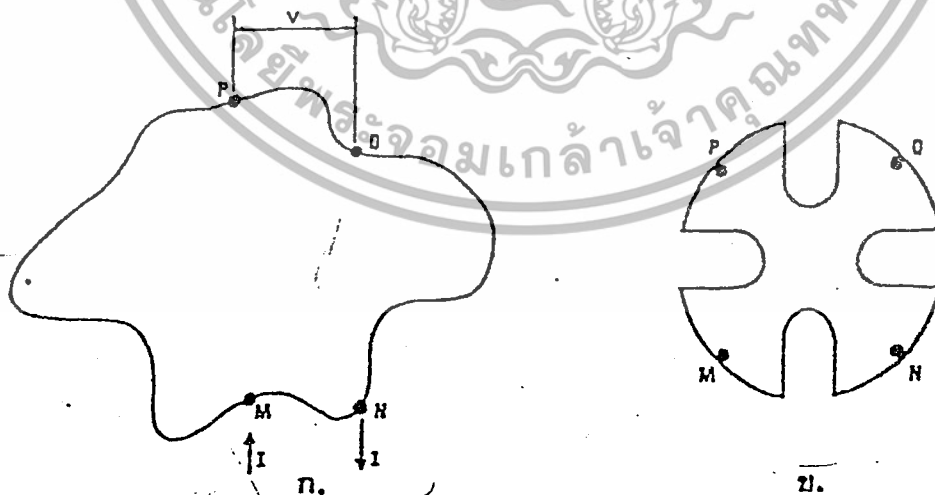
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการจี้หัวแรงลงไปบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อแผ่นฟิล์มได้มาก โดยในการลดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อแผ่นฟิล์มนั้นเราสามารถทำได้ โดยในขณะที่เราทำการจี้หัวแรงลงบนแผ่นฟิล์มเราควรทำการจี้บริเวณขอบ ๆ ของแผ่นฟิล์ม

7.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี แวนเดอร์เพอร์ และคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้า

เนื่องจากอิเล็คตรอนและโฮล [15]

จากการทดลองการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องการมีการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกขึ้นมาก่อน เพราะเราไม่สามารถวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนชิ้นสารกึ่งตัวนำได้โดยตรง เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารกึ่งตัวนำน้อยมากจนกระทั่งวัดค่าได้ลำบาก ทั้งนี้เกิดจากมีความต่างศักย์ต่อกคร่อมที่รอยต่อของปลายเข็ม โลหะที่ใช้ทำขั้วสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ รอยต่อนี้จึงขัดขวางการไหลของกระแส สำหรับในที่นี้จะใช้โลหะอินเดียมมาทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับชิ้นงานซึ่งเป็นฟิล์มบาง โดยทำรอยต่อเป็นจุดจำนวน 4 จุดที่ชิ้นสาร สิ่งสำคัญในการทำก็คือต้องพยายามทำให้ได้จุดที่มีขนาดเล็กที่สุด เมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร เพื่อป้องกันการบิดเบี้ยวของเส้นสมคักย์ จากนั้นจึงใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนแผ่นทองแดงที่ถูกทำขั้วไว้แล้วสี่ขั้วด้วยการโยงลวดทองแดงเปลือยเส้นสั้น ๆ จากขั้วทั้งสี่ของแผ่นทองแดงเข้ากับจุดทั้งสี่ของโลหะอินเดียม ดังรูปที่ 7.21 วัดค่ากระแส I_{MN} ค่าต่าง ๆ และความต่างศักย์ V_{PO} รวมทั้งค่ากระแส I_{NO} และความต่างศักย์ V_{MP} แล้วนำข้อมูลที่มาเขียนกราฟระหว่างกระแสกับ ค่าความต่างศักย์ เพื่อหาค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ซึ่งวิธีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าค้นคว้าได้จากเอกสารอ้างอิงลำดับที่ [15]



รูปที่ 7.21 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง

ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

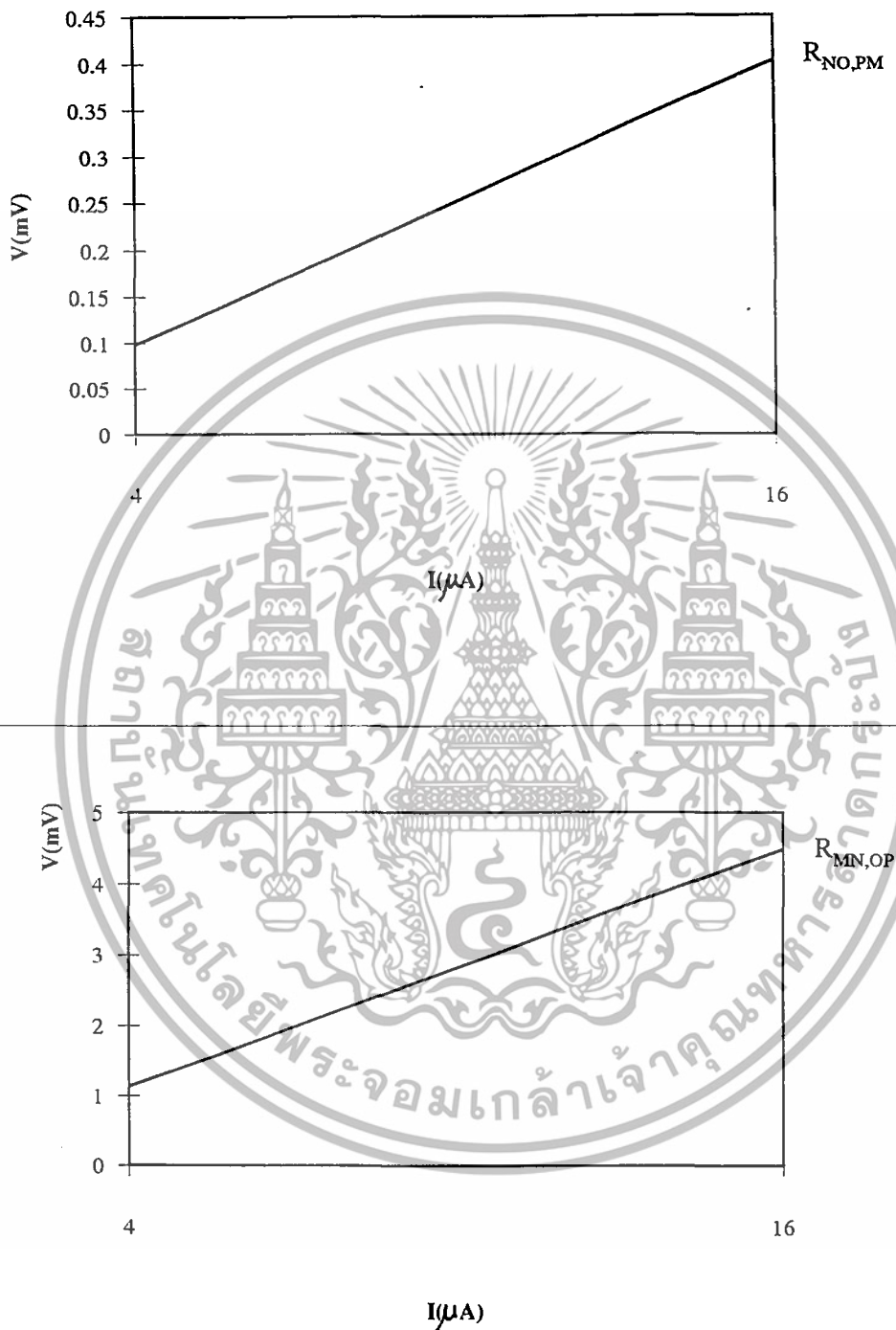
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดสภาพความนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuInSe_2 เราสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มชนิดพีได้มีค่าเป็น 1.4 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร และ 0.9 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร ในชนิดเอ็น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันแสดงดังกราฟ รูปที่ 7.22 และ 7.23

สำหรับกราฟในรูปที่ 7.24 และ 7.25 เป็นกราฟที่ได้จากการทดลอง เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของรอยต่อโอห์มมิกระหว่างฟิล์มบาง CuInSe_2 กับ โลหะอินเดียม แต่ว่าผลที่ออกมานั้นเราไม่สามารถหาค่าของกระแสชาร์ตสันได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นได้นั้นยังมีความเป็นอะมอร์ฟัสอยู่มาก

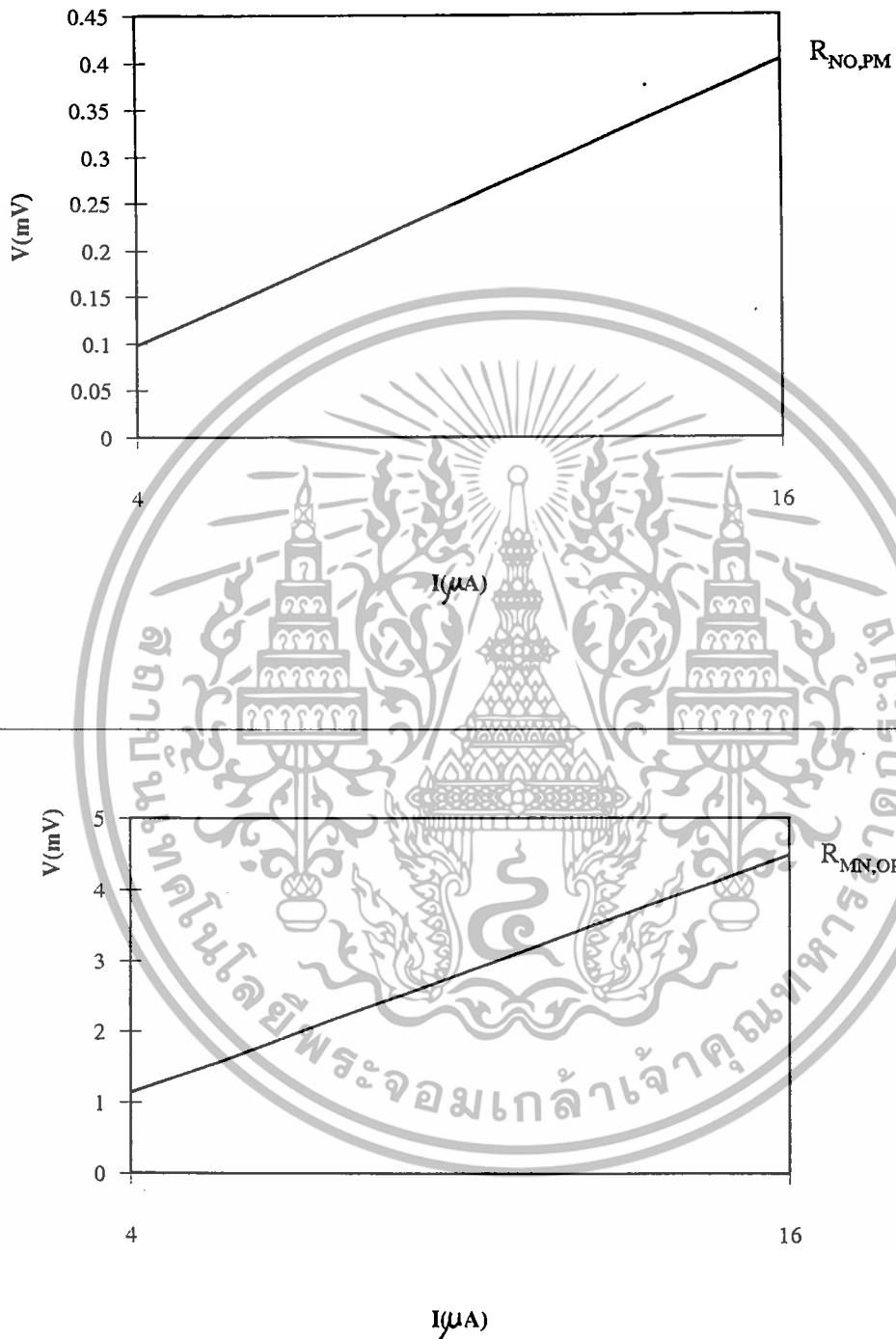


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



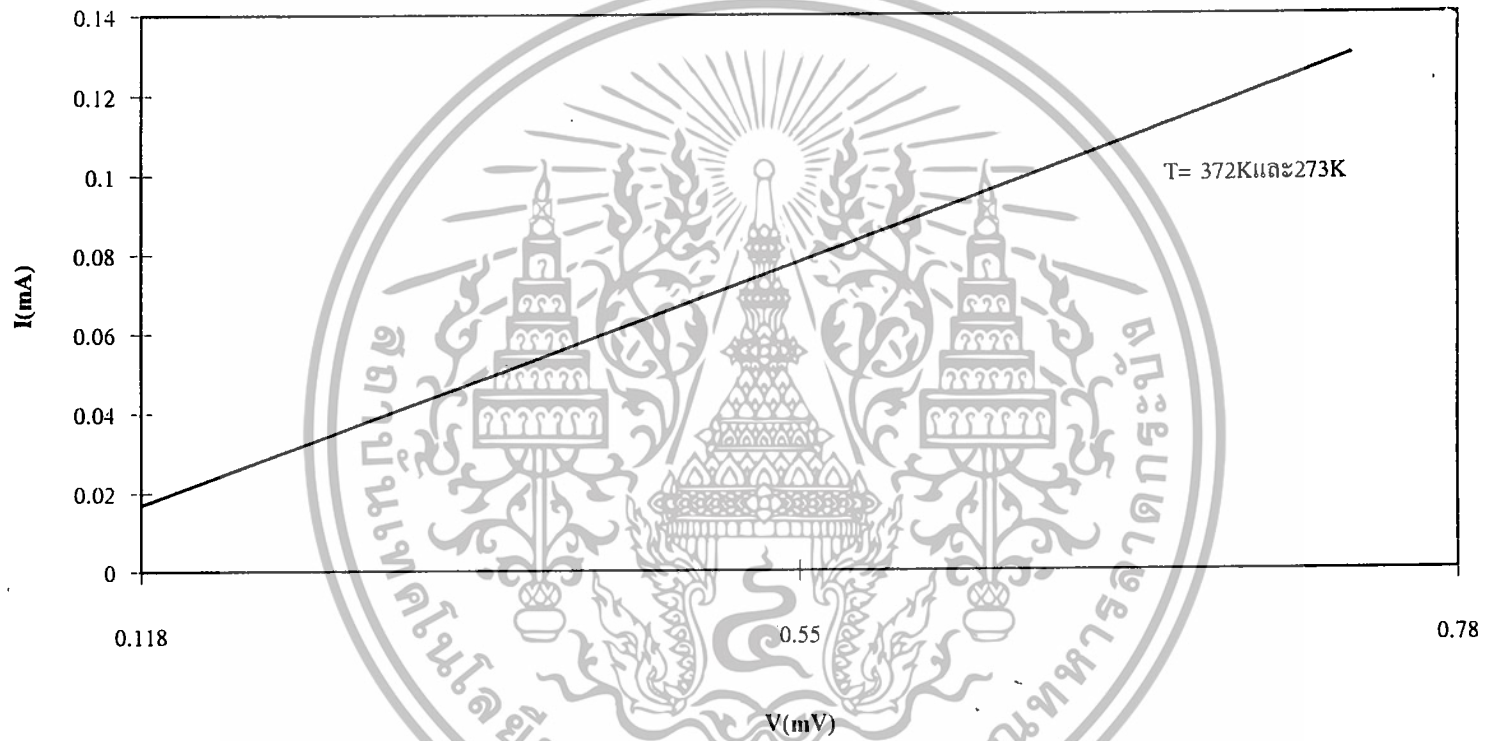
รูปที่ 7.22 กราฟแสดงค่า $R_{\text{MN,OP}}$ และ $R_{\text{NO,PM}}$ ของฟิล์มบาง p-CuInSe₂ ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

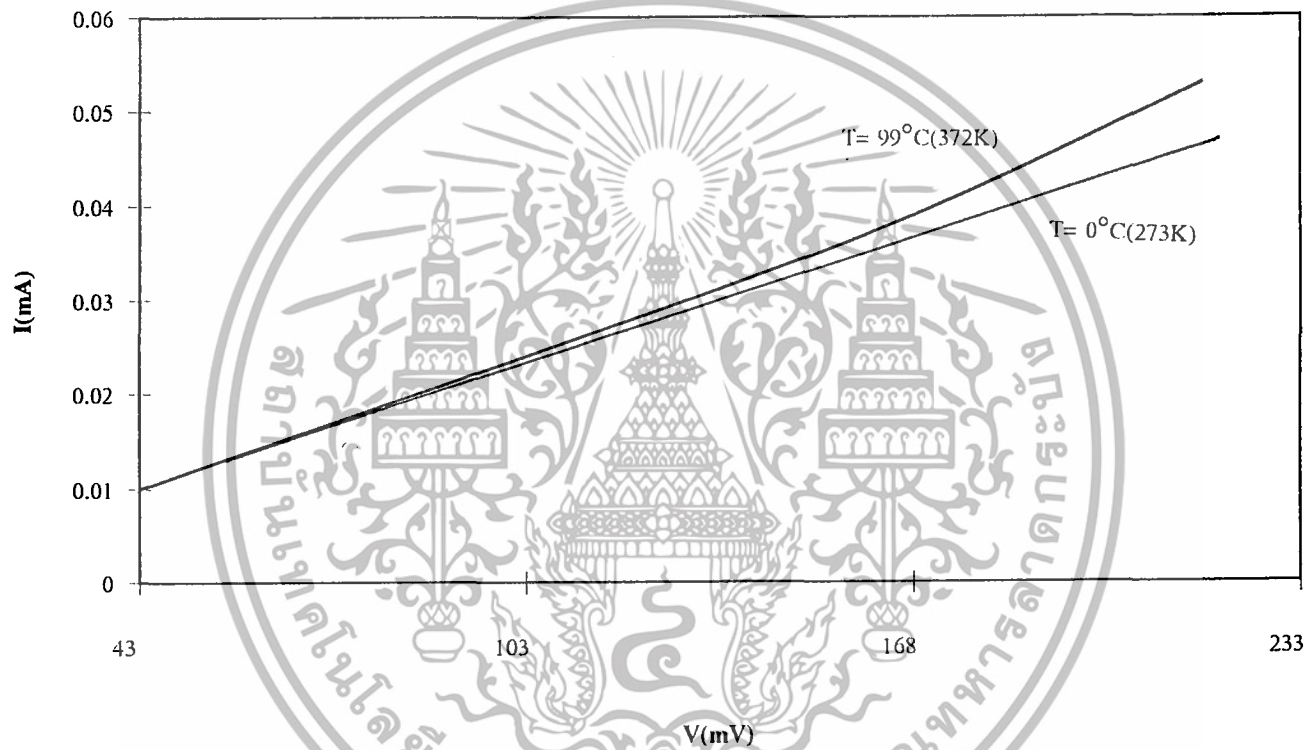


รูปที่ 7.23 กราฟแสดงค่า $R_{\text{MN,OP}}$ และ $R_{\text{NO,PM}}$ ของฟิล์มบาง $n\text{-CuInSe}_2$ ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.24 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง $p\text{-CuInSe}_2$ กับ In ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 7.25 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง n-CuInSe₂ กับ In ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

บทที่ 8

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ เราได้ทำการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซไลไนด์โดยวิธีไครเรชันัล ฟริชซิง จากนั้นจึงทำการเตรียมฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซไลไนด์โดยวิธีการระเหยในระบบสุญญากาศ แล้วจึงทำการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้า ศึกษาโครงสร้าง ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า พร้อมทั้งทำการศึกษาลักษณะรอยต่อโอห์มมิกระหว่างโลหะอินเดียมกับแผ่นฟิล์มของ CuInSe_2 และจากการสร้างชั้นของฟิล์มบางของเซลล์แสงอาทิตย์ เราได้ทำทดลองวัดคุณลักษณะด้วย

จากก้อนผลึกเดี่ยวที่เราได้ทำการเตรียมขึ้นมา 2 หลอด เมื่อทำการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยวิธีวัดชั่วคราว เราพบว่า หลอดที่หนึ่งมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น ส่วนหลอดที่สองมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี ชนิดการนำไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน แต่ละสารตัวอย่างมีชนิดการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการระเหยไปของซิลิเนียมในปริมาณที่แตกต่างกันขณะที่ทำการหลอมสาร หรือ อาจมีสาเหตุเนื่องจากความละเอียดในการชั่งธาตุก็เป็นไปได้เช่นกัน

จากการศึกษาถึงเงื่อนไขของการเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เราพบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้นบนกระจกสไลด์ที่ได้ทำการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และไม่มีรอยขีดข่วนจะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดี ไม่หลุดลอกได้ง่าย และได้ความหนาที่มากกว่ากรณีเคลือบบนกระจกที่ไม่ได้รับการอบ และมีรอยขีดข่วน และ พบว่าแผ่นฟิล์มที่ทำการเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นเอ็นนั้นก็จะได้แผ่นฟิล์มที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็นเช่นกัน ส่วนแผ่นฟิล์มที่เตรียมขึ้นจากสารตั้งต้นที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นพีนั้นก็จะได้แผ่นฟิล์มที่มีชนิดการนำไฟฟ้าชนิดเป็นพีด้วย

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นนั้น ฟิล์มบางชนิดพีมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 1.4 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร และ 0.9 กิโลโอห์มต่อตารางเซนติเมตร ในชนิดเอ็น

จากก้อนผลึกเดี่ยวที่เตรียมได้ เมื่อนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สเปกตรัมการเลี้ยวเบนสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน ซึ่งแสดงโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ ด้วยค่าคงที่ผลึก $a = 5.785(0)$ อังสตรอม , $c = 11.627(7)$ อังสตรอม และ $c/a = 2.01$ ทั้งในชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพี เมื่อไม่ได้ใช้ธาตุซิลิกอนเป็นตัวมาตรฐาน แต่เมื่อเราใช้ธาตุซิลิกอนเป็นตัวมาตรฐาน ค่าคงที่ผลึกจะมีค่า $a = 5.789(7)$ อังสตรอม , $c = 11.645(6)$ อังสตรอม และ $c/a = 2.01$

ส่วนสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ได้ออกมาแล้วแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นได้นั้นยังมีความเป็นอะมอร์ฟี่อยู่มาก การที่ฟิล์มบางนั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีพอ นั้นทำให้ส่งผลกระทบต่อการศึกษาต่อไอหุ้มมิกระหว่างโลหะอินเดียมกับแผ่นฟิล์ม CuInSe_2 และทำให้คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นนั้นมีผลออกมาไม่เป็นที่น่าพอใจเท่าใดนัก

8.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

- ขณะทำการปลูกผลึกเราต้องทำการควบคุมอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นและลดลงในอัตราต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับช่วงของอุณหภูมิ โดยในการเพิ่มหรือลดอุณหภูมินั้นควรทำการค่อย ๆ เพิ่มหรือลดให้เป็นไปตามอัตราการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิ
- ภาชนะและระบบที่ทำการปลูกผลึกควรทำความสะอาดให้สะอาดที่สุด
- ในการเตรียมแผ่นฟิล์มบางในระบบสุญญากาศนั้น ขณะที่ทำการปั๊มให้ระบบเป็นสุญญากาศ ควรตรวจสอบและดูแลระบบตลอดเวลา เช่น การปิดครอบแก้วไม่สนิททำให้มีอากาศเข้าไปในระบบ
- เมื่อทำความสะอาดแผ่นกระจกใสที่นำมาทำเป็นแผ่นรองรับให้สะอาด และไม่ควรใช้มือจับที่แผ่นสไลด์
- ในขณะที่จ่ายความต่างศักย์ให้กับแผ่นให้ความร้อนต้องคอยดูแลแผ่นความร้อน เพราะแผ่นความร้อนที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้เป็นแผ่นความร้อนที่ใช้กับกาดม่น้ำซึ่งมีอายุการใช้งานไม่ยาวนานมากนัก ซึ่งถ้าเปลี่ยนไปใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนนั้นน่าจะดีกว่า
- ในระบบสุญญากาศระบบหนึ่ง ๆ เราควรใช้กับการระเหยสารที่เป็นชนิดเดียวเท่านั้น เพราะในระบบสุญญากาศหนึ่ง ๆ ที่ใช้ระเหยสารมากกว่าหนึ่งชนิดนั้นจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารต่างชนิดกัน และ ควรจะมีระบบในการควบคุมความหนาของฟิล์มบางด้วย
- ถังมือที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางนั้นไม่ควรเป็นถังมืออย่างที่มิฝุ่นเป็งติดมากับถังมือ และห้ามใช้มือเปล่าแตะระบบสุญญากาศ
- ในขณะที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe_2 ควรให้อุณหภูมิกับแผ่นรองรับประมาณ 450 - 500 องศาเซลเซียส มิฉะนั้นแล้วฟิล์มบางที่ได้จะมีความเป็นอะมอร์ฟี่สมาก ซึ่งครอบแก้วที่ใช้ควรเป็นสเตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. N.B.Hannay , *Semiconductors* , Reinhold Publishing Corporation , New York , 1959 : 87-140.
2. A.S.R.De Kok , “Crystal Growth of Bulk Crystals : Purification , Doping and Defects” , *Handbook of Semiconductor* , Vol. 3 , North-Holland publishing Company , 1980 : 247-333
3. N.Romeo , V.Canvevari , G.Sberveglierri , A.Bosio and L. Zanotti , “Growth of Large Grain CuInSe₂ Thin Films by Flash-Evaporation and Sputtering” , *Solar cells* , 16(1986) : 155-164.
4. Pamplin and R.S.Fiegelson , *Thin Solid Films* , 60(1979) : 141
5. Thornton and T.C.Lommasson , “Magneto Reactive Sputtering of Copper - Indium - Selenide” , *Solar cells* , 16(1986) : 165-180.
6. L.L.Kazmerdki , M.S.Ayyagari , F.R.White and G.A.Sanborn , “Growth and properties of vacuum deposited CuInSe₂ thin films” , *J. Vac. Sci. Technol.* , Vol.13, No.1 , 1976 : 139-143.
7. Neelsanth G.Dhere , M.Cristina Lourenco and Ramesh G.Dhere , “Preparation and Characterization of Vacuum Deposited CuInSe₂ Thin Film” , *Solar cells*, 16(1986) : 369-380.
8. A.Rockett , “CuInSe₂ for photovoltaic Application” , *J. Appl. Phys.* , Vol. 70 , No. 7 , 1991. : R81-R97.
9. A.N.Y.Samaan , R.Vaidhyanathan and R.Noufi , “Growth and Characterization of polycrystalline CuInSe₂ Thin Film ” , *Solar cell* , 16(1986) : 181-198.
10. พัลภา ศรีสุกใส และ พรชัย จรัสสุนทรวงษ์ , “ฟิล์มบาง CuInSe₂ จากการระเหยสาร 1 จุด ควบคุมโดยไอบี เอ็ม พีซี” , *โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต , ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ , สจล., 2534.*
11. จูตินัย แก้วแดง , “การเตรียมผลึกและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInSe₂)” , *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. C.Kittel., Introduction to Solid State Physics , 4th edition , John Wiley & Sons New York , 1971 : 1-37 , 45-55.
13. คูสิต เครื่องงาม , โพลิตสเตรทฟิสิกส์ , หจก. เอช-เอน การพิมพ์ , กรุงเทพฯ , 2535 , หน้า 142-146.
14. R.D.Tomlinson , “Fabrication of CuInSe₂ Single Crystals using Melt-Growth Techniques” , Solar cells , 16(1986) : 17-26.
15. งามนิตย์ วงษ์เจริญ “ การศึกษารอยต่อแบบโลหะ - ฉนวน - สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์-อินเดียมไดซัลไฟด์ ” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2531.
16. T.Datta , R.Noufi , and K.Dbe , “Electrical Conductivity of p-type CuInSe₂ Thin Films” Appl. Phys. Lett. , Vol. 47 , No. 10 , 1985 : 1102-1104.
17. ยุทธ อัครมาส , ฟิสิกส์ของระบบเซมิคอนดักเตอร์ , คณะวิทยาศาสตร์ , จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2532 , หน้า 12-13.
18. S.M. Sze , Physics of Semiconductor Devices , 2th edition , John Wiley & Sons , New York , 1981 : 790-830.
19. C.Rincon , C.Bellabarba , J.Gonzalez and G.Sanchez Perez “Optical Properties and Characterization of CuInSe₂” Solar cells , 16(1986) : 335-349.
20. S.Isomura , A.Nagamatsu and K.Shinohara “Preparation and Some Semiconducting Properties of CuInSe₂ Thin Films” Solar cells 16(1986) : 143-153.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23-207

d	2.07	1.13	1.20	3.38	(CuInSe ₂) _{8F} (High pressure form III)						
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			
						1.346	30	331			
Sys. Cubic			S.G.			1.195	70	422			
a ₀ 5.86	b ₀	c ₀	A	C		1.126	80	511,333			
α	β	γ	Z [2]	Dx 5.55							
Ref. Ibid.											
ε _α	nωβ	mp	cy	Sign							
2V	D			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)						
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			
						1.279	25	331			
Sys. Cubic			S.G.			1.140	60	422			
a ₀ 5.58	b ₀	c ₀	A	C		1.074	75	511,333			
α	β	γ	Z [2]	Dx 6.42							
Ref. Ibid.											
ε _α	nωβ	mp	cy	Sign							
2V	D			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		d A	l/l ₁	hkl	d A	l/l ₁	hkl
Cut off	l/l ₁ Microdensitometer					5.20	6	101	0.9777	30	516,532
Ref.	Parkes et al., Dept. of Electrical Engineering, University of Salford, England					3.34	70	112	.9482	2	437,507*
						3.20	6	103	.9180	15	0212
						2.52	15	211	.9140	30	620,064
						2.15	6	105,213	.8821	20	3211
Sys. Tetragonal			S.G.	142d (122)		2.04	100	204,220	.8609	6	509,439
a ₀ 5.782±0.001	b ₀	c ₀	11.621±0.001	C 2.010		1.900	6	301	.8415	10	545,633
α	β	γ	Z [4]	Dx [5.75]		1.743	85	116,312	.8357	15	448
Ref. Ibid.						1.480	6	305,323	.8255	8	529
						1.446	25	400	.8134	8	1114
ε _α	nωβ	mp	cy	Sign		1.393	4	217,411	.8125	20	5110
2V	D			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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4-836

d	2.09	1.81	1.28	2.09	Cu	★					
I/I ₁	100	46	20	100	Copper						
Rad. CuKα ₁ λ 1.5405 Filter Ni Dia. 1" Cutoff 1/1; Diffractometer I'1 Ref. Swanson and Tatge, JC Fel. Reports, NBS (1949)						d Å	I/I ₁	hkl	d Å	I/I ₁	hkl
Sys. Cubic S.G. O _h ³ -Fm3m C a ₀ 3.6150 b ₀ c ₀ α β γ Z 4 Dx 8.936						2.968	100	111			
Ref. Ibid.						1.508	46	200			
						1.273	20	220			
						1.0900	17	311			
						1.0436	5	222			
						0.8038	3	400			
						.8293	9	351			
						.8083	8	420			
α	nwβ	γ	δ	ε	ζ	η	θ	ι	κ	λ	μ
2V	D	mp	Color	Sign							
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						
Rad. CuKα ₁ λ 1.5405 Filter Ni Dia. 1" Cutoff 1/1; G. C. DIFFRACTOMETER d corr. abs. Ref. SWANSON AND FOYAT, NBS CIRCULAR 539, VOL. II						d Å	I/I ₁	hkl	d Å	I/I ₁	hkl
Sys. TETRAGONAL a ₀ 3.2517 b ₀ c ₀ 4.9459 α β γ Z 2 C 1.321						2.715	100	101			
Ref. Ibid.						2.471	21	002			
						2.298	36	110			
						1.683	24	112			
						1.625	12	220			
						1.470	16	103			
						1.395	23	211			
						1.258	21	202			
						1.2368	3	004			
						1.1493	5	220			
						1.0904	12	213			
						1.0587	4	301			
						1.0425	5	222			
SAMPLE FROM FISHER SCI. CO. SPECT. ANAL.: <0.01% Fe, Ni, Si, Sm; <0.001% Al, Cu, Ca; <0.001% Ag.						1.0282	8	310			
X-RAY PATTERN AT 26°C.						0.9845	1	204			
						.9495	3	312			
						.9056	2	303			
						.8874	4	321			
						.8180	3	215			
REPLACES 1-1042											

6-0362 MAJOR CORRECTION

d	3.01	3.78	2.07	2.78	(Se) ₂₃	★					
I/I ₁	100	55	35	55	SELENIUM						
Rad. CuKα ₁ λ 1.5405 Filter Ni Dia. 1" Cutoff 1/1; DIFFRACTOMETER d corr. abs. Ref. SWANSON ET AL., NBS CIRCULAR 539 VOL. II (1952)						d Å	I/I ₁	hkl	d Å	I/I ₁	hkl
Sys. HEXAGONAL a ₀ 4.3682 b ₀ c ₀ 4.9538 α β γ Z 3 C 1.1345 D 4.809						3.73	55	100	2.026	2	204
Ref. Ibid.						3.00	100	101	1.028	2	311
						2.334	16	110	0.959	2	122
						2.072	23	102			
						1.998	22	111			
						1.890	4	200			
						1.756	22	201			
						1.650	22	003			
						1.637	12	112			
						1.512	8	103			
						1.502	10	202			
						1.429	22	210			
						1.372	4	211			
						1.317	6	113			
SAMPLE FROM THE HALLINGRODT CHEM. WKS. SPECT. ANAL.: <0.01% O, Al, Si; 40.001% S, Se, Ca, Cu, Fe; <0.001% Ag, Bi, Co, Li.						1.244	2	203			
X-RAY PATTERN AT 26°C.						1.228	4	212			
						1.221	4	301			
						1.175	6	104			
						1.123	4	202			
						1.090	5	202			
• P3-21 (132) OR P3-21 (134)											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พุทธศักราช 2518 ที่เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนพรตพิทยพยัต และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้