



รอยต่อโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซลิไนต์



นางสาวอัมพวรรณ บัวบุตร

ร.ร.

๑๖๖๖ ร

๒๕๓๙

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

๖๑๒๕๕๑๕๑ x

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๓๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## **Ohmic Contact of $\text{CuInSe}_2$ Semiconductor**



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

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ รอยต่อไอทมิกของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซลิไนด์  
โดย นางสาวอัมพวรรณ บัวบุตร  
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง  
ผศ.งามนิตย์ แก้วแดง  
ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ  
ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
( รองศาสตราจารย์ สุรพล รักวิชัย )

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

..... ประธานกรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง )

..... กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง )

..... กรรมการ

( ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ )

..... กรรมการ

( ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ )

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

โดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

ภาควิชา

ปีการศึกษา

รอยต่อไอหุ้มมิกของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซลิไนด์

นางสาวอัมพวรรณ บัวบุตร

ผศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

ผศ.งามนิตย์ แก้วแดง

ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

ฟิสิกส์ประยุกต์

2539

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาของโครงการพิเศษนี้ได้เตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  แบบไดเรกชันนัล ฟริชซิงโดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา โครงสร้างของผลึกเดี่ยวที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นแบบเตตระโกนอลมีค่า  $a=5.789(7)$ อังสตรอม,  $c=11.645(6)$ อังสตรอม และ  $ca=2.01$  ซึ่งผลึกที่เตรียมได้นี้พบทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นและมีสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1-9.0 โอห์ม-เซนติเมตร รอยต่อระหว่างโลหะผสม In-Sn-Cd กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นจะได้รอยต่อแบบไอหุ้มมิกที่ดีหลังจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนบริสุทธิ์ จากการศึกษาคูสมบัติของกระแสและความต่างศักย์พบว่ารอยต่อจะไม่แสดงการขัดขวางการไหลของกระแสที่ความหนาแน่นของกระแสประมาณ 120 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ทุกๆอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิจนไนโตรเจนเหลวขึ้นไป พลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนชนิดอินทรีนิกของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ 104 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และ 150 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ 103 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และ 15 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title            Ohmic Contact of CuInSe<sub>2</sub> Semiconductor  
Name                                Miss. Aumpawan Baubutr  
Special Project Adviser        Asst. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang  
    Asst. Prof. Ngamnit Gaewdang  
    Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat  
    Dr. Tiparatana Wongcharoen  
Department                        Applied Physics  
Academic Year                    1996

### Abstract

The crystalline bulk of CuInSe<sub>2</sub> semiconductor used in the special project study were prepared by directional freezing method using temperature gradient freezing 5 degree tilt-furnace techniques. The single phase of the as-grown crystal was verified using conventional X-ray diffraction techniques. The electrical conductivity types were found either p-type or n-type with resistivity in the range 0.1-9.0 Ω-cm. The crystal structure was found to be tetragonal chalcopyrite structure with lattice parameters  $a = 5.789(7) \text{ \AA}$ ,  $c = 11.645(6) \text{ \AA}$  and  $c/a = 2.01$ . The contact of In-Sn-Cd alloy on both types of CuInSe<sub>2</sub> gave good ohmic contact after annealing at 500°C for 20 minutes in N<sub>2</sub> atmosphere. At liquid nitrogen temperature we found I-V characteristic showed no-sign of blocking at current density of approximately 120mA/cm<sup>2</sup>. As the rising temperature, the increasing the Richardson's current density is observed. The ionization energy of intrinsic impurity levels of 104 meV, 150meV in p-type samples and 103 meV, 15 meV in n-type samples were obtained.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ที่คอยให้คำแนะนำรวมทั้งเอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ใช้เครื่องบีบสูญญากาศที่ความดันต่ำ และขอขอบคุณ อ. ประเสริฐ พิมขาวขำ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพพล สุธงษิณี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่อง X-ray diffractometer ในการศึกษาโครงสร้างของโครงสร้างผลึก

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา เป็นอย่างยิ่งที่มีความอนุเคราะห์ ให้ใช้ระบบสูญญากาศในการเตรียมฟิล์มบาง และ อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟที่ให้กระแสสูง รวมทั้งความรู้และคำแนะนำต่างๆที่ท่านอาจารย์มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณ คุณรัชชัย ขาวประเสริฐ รวมทั้งพนักงานที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ สจล. ที่ให้ยืมเครื่องมือต่างๆและขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา และ ที่ขาดเสียมิได้ ขอขอบคุณ คุณ ศทิพวรรณ คล้ายบุญมี และ คุณ ชิติมา นาครินทร์ ที่ช่วยเหลือตลอดโครงการนี้

ท้ายสุดขอขอบพระคุณคุณแม่ ที่เป็นห่วงและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำ.....	4
2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2 โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.2.1 โครงสร้างแบบเพชร.....	7
2.2.2 โครงสร้างแบบสฟาลเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์.....	8
2.2.3 โครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์.....	9
บทที่ 3 สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.....	11
3.1 เฟสไดอะแกรม.....	11
3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ.....	12
3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการนำไฟฟ้า.....	13
3.4 การทำความสะอาดผิวหน้าผลึก.....	14
3.5 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	15
บทที่ 4 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำจากสภาวะหลอมเหลว.....	17
4.1 การเตรียมผลึกในระบบปิดแบบไดเรกชันนัล ฟรีซซิง.....	17
4.1.1 วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์.....	18
4.1.2 วิธีลดอุณหภูมิ.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 ข้อควรระวังในการเตรียมผลึกกิ่งตัวนำ.....	19
<b>บทที่ 5 การศึกษาค่าคงที่ของ โคร่งผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....</b>	<b>21</b>
5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึก.....	21
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ โคร่งผลึก.....	22
5.3 ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเนื่องจากระนาบต่างๆ ในผลึก.....	23
<b>บทที่ 6 สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....</b>	<b>25</b>
6.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน.....	25
6.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก.....	27
6.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก.....	28
6.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและ โฮล.....	29
6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	30
6.3.1 วิธีวัด โดยตรง.....	31
6.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว.....	31
6.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง.....	32
6.3.4 วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน.....	33
6.3.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	34
<b>บทที่ 7 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....</b>	<b>38</b>
7.1 แบบจำลองของชอตต์กี.....	38
7.2 ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน.....	40
7.3 ผลของชอตต์กี.....	45
7.4 กระแสที่เกิดจากการลอดผ่านกำแพงศักย์.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 8 รอยต่อแบบโอห์มมิก.....	50
บทที่ 9 วิธีและผลการทดลอง.....	58
9.1 การเตรียมผลึก.....	58
9.1.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดี่ยวและส่วนประกอบของระบบเตา.....	58
9.1.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิเตา.....	59
9.1.3 ส่วนประกอบของระบบเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา.....	61
9.1.4 การเตรียมหลอดแก้วกวอท์ซ์เพื่อบรรจุสาร.....	62
9.1.5 ขั้นตอนและรายละเอียดในการเตรียมผลึก.....	66
9.2 การขัดชั้นผลึก.....	68
9.2.1 การสร้างเครื่องขัด.....	68
9.2.2 ขั้นตอนการขัดแผ่นชั้นสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ .....	69
9.2.3 การกัดผิวหน้าของชั้นผลึกด้วยสารละลายเคมี.....	69
9.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก.....	70
9.4 การตรวจชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้า.....	73
9.4.1 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีขั้วความร้อน.....	73
9.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	73
9.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก.....	75
9.5.1 การแอนนัลสาร.....	75
9.5.2 การเตรียมแผ่นรองชั้นสาร.....	77
9.5.3 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง.....	79
บทที่ 10 สรุปผลและวิจารณ์.....	115
เอกสารอ้างอิง.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สารบัญ(ต่อ)**

**หน้า**

ภาคผนวก.....120

    ภาคผนวก ก.....120

    ภาคผนวก ข.....121

ประวัติผู้เขียน.....123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่างๆของผลึก $\text{CuInSe}_2$ .....	14
3.2 แสดงชนิดของสารละลายเคมีและวิธีปฏิบัติเพื่อทำความสะอาดผิวผลึก $\text{CuInSe}_2$ .....	15
3.3 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบ โอลิเมอร์ของ $\text{CuInSe}_2$ .....	15
6.1 แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน.....	37
9.1 แสดงน้ำหนักที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหลอมสารกึ่งตัวนำจำนวน 15 กรัมที่มีสัดส่วนตามสโตยอชิโอเมตรรี.....	64
9.2 แสดงชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้จากวิธีไคเรกซ์นำลพรีซซิง โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา.....	74
9.3 แสดงผลของการศึกษาการรอยต่อแบบ โอลิเมอร์ระหว่าง โลหะผสมของอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำที่วัดได้.....	82
9.4 แสดงค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเองเนื่องจากความบกพร่องของผลึกของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ (พลังงานมีหน่วยเป็น มิลลิอิเล็กตรอน โวลท์) ที่คำนวณได้.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารตัวนำสารกึ่งตัวนำและฉนวน.....	4
2.2 แสดงแถบพลังงานที่อนุญาตให้อิเล็กตรอนมีค่าได้ของแลททิซที่มีลักษณะเป็นคาบ	6
2.3 แสดงพันธะสีหน้า.....	7
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	8
2.5 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์.....	9
2.6 แสดงโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์.....	10
3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ $CuInSe_2$ .....	12
4.1 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดี่ยว.....	18
5.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์.....	22
6.1 แสดงไดอะแกรมแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะ การกระจายของฟังก์ชัน เฟอร์มี-ดิแรก และความหนาแน่นพาหะอิสระ ตามลำดับ ก) สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	29
6.2 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้ว.....	32
6.3 แสดงตำแหน่งของขั้วสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง.....	32
6.4 ก) แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง ข) การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเมื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด.....	35
6.5 แสดงแฟลคเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.1 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูป ก. และ ข. มีค่า $\phi_m > \chi_s$ ส่วนรูป ค. และ ง. มีค่า $\phi_m < \chi_s$ รอยต่อในรูป ข. เป็นชนิดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว รอยต่อในรูป ง. เป็นชนิดโอห์มมิก.....	39
7.2 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี รูป ก. และ ข. มีค่า $\phi_m < \chi_s$ ส่วน ค. และ ง. มีค่า $\phi_m > \chi_s$ รอยต่อในรูป ข. เป็นชนิดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว รอยต่อในรูป ง. เป็นชนิดโอห์มมิก.....	40
7.3 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก. ขณะไม่มีการไบอัส(zero bias)อยู่ในสถานะสมดุลเชิงความร้อน ข. ขณะไบอัสตรง (forward bias) ค. ขณะไบอัสกลับทาง (reverse bias).....	41
7.4 แสดงการลดลงของค่าแรงสัทธิงเนื่องจากสนามไฟฟ้า.....	46
7.5 แสดงการลดลงของค่าแรงสัทธิงอันเนื่องมาจากผลของขอตด์กีและทิศทางการไหล ของกระแสผ่านค่าแรงสัทธิงขณะไบอัสตรง.....	47
8.1 แผนภาพแสดงกลไก(mechanism)การเกิดรอยต่อแบบ โอห์มมิก ก. รอยต่อที่ค่าแรงสัทธิงมีค่าต่ำ ข. รอยต่อที่เกิดจากการโต้ปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล.....	51
8.2 ก. ภาพแสดงสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น-โลหะซึ่งใช้ในการ ศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ข. แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่สอดคล้องกับสิ่งประดิษฐ์ในรูป ก.....	52
8.3 แสดงทิศทางและขนาดของกระแสริชาร์ดสันที่ไหลข้ามค่าแรงสัทธิง $\phi_{B1}$ และ $\phi_{B2}$ ตามลำดับในขณะที่ไม่มีการให้ความต่างศักย์แก่สิ่งประดิษฐ์.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ดังรูปที่ 8.2 ก. ซึ่งทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) กับอุณหภูมิที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ.....	55
8.5 แสดงอุณหภูมิ $T_u$ และ $T_c$ ที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ.....	56
8.6 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์จากกระแสชาร์ดสันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	57
9.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาโซนเดี่ยวพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ.....	59
9.2 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิของเตาโซนเดี่ยว.....	60
9.3 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโดยที่อุณหภูมิกลางเตาเป็น 1100, 1000, 900, 800, 700, 600, 500 องศา ตามลำดับ.....	60
9.4 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิของเตา.....	61
9.5 แสดงระบบเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา ขณะกำลังหลอมสารที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส.....	62
9.6 แสดงหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุ Cu, In, Se ก่อนนำไปหลอม.....	65
9.7 แสดงขนาดของผลึกกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา.....	67
9.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	68
9.9 แสดงความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากผลึกผง $CuInSe_2$ กับองศา.....	72
9.10 แสดงการตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีวัดความร้อน.....	73
9.11 แสดงระบบเตาที่ใช้ในการแอนนีสสารและระบบนำแก๊ส.....	76
9.12 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดี่ยวที่ใช้ในการแอนนีส.....	77
9.13 แสดงชิ้นสารที่วางอยู่บนแผ่นรองและมีการเชื่อมต่อระหว่างจุดของขั้ว.....	78
9.14 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดกระแส-ความต่างศักย์ (I-V) ของสิ่งประดิษฐ์.....	78
9.15 กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.16กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	85
9.17กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	86
9.18กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	87
9.19กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	88
9.20กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	89
9.21กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	90
9.22กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	91
9.23กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	92
9.24กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของฟิล์มบาง n-CuInSe <sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	93
9.25กราฟแสดงค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ ของฟิล์มบาง p-CuInSe <sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	94
9.26 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อ ระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	95
9.27 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อ ระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	96
9.28 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อ ระหว่างที่ n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb อุณหภูมิต่างๆ.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.29 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง p-CuInSe <sub>2</sub> กับ In ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	98
9.30 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง n-CuInSe <sub>2</sub> กับ In ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	99
9.31 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ที่ค่าต่างๆ.....	100
9.32 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ที่ค่าต่างๆ.....	101
9.33 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ที่ค่าต่างๆ.....	102
9.34 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1กับ In-Pb..	103
9.35 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2กับ In-Pb..	104
9.36 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1กับ In-Pb..	105
9.37 แสดงการหาค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ p-CuInSe <sub>2</sub> #1 จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	106
9.38 แสดงการหาค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ p-CuInSe <sub>2</sub> #2 จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	107
9.39 แสดงการหาค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ n-CuInSe <sub>2</sub> #1 จากกราฟระหว่างส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	108
9.40 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน(I <sub>01</sub> )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In ที่อุณหภูมิห้อง.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.41 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน( $I_{01}$ )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In ที่อุณหภูมิห้อง.....	110
9.42 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน( $I_{01}$ )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In ที่อุณหภูมิห้อง.....	111
9.43 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน( $I_{01}$ )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ77องศาเคลวิน.....	112
9.44 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน( $I_{01}$ )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe <sub>2</sub> #2 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ77องศาเคลวิน.....	113
9.45 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน( $I_{01}$ )จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe <sub>2</sub> #1 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ77องศาเคลวิน.....	114

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันเรารู้จักสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำกันเป็นอย่างดี โดยที่สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสารชนิดนี้มีคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญที่สุดคือสามารถควบคุมความหนาแน่นและชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้าได้ มีผลตอบสนองเชิงไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบ (photo electronic effect) หรือเมื่อมีพลังงานความร้อนตกกระทบ (thermo electric effect) มีสมบัติเชิงไฟฟ้าในช่วงกลางระหว่างฉนวนและโลหะ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้เราได้นำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากมาย เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์กึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ นั้นต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่น หากต้องการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ สารกึ่งตัวนำที่เลือกใช้จะต้องมีสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม [1] ก็คือลักษณะโครงสร้างและขนาดช่องว่างของแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ลักษณะแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) จะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าแบบเฉียง (indirect band gap) นอกจากนี้พาหะที่เกิดขึ้นนี้จะต้องมีช่วงชีวิต (life time) ที่ยาว และเคลื่อนที่ได้ดี (high mobility) สารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป เช่น Si ที่ได้มีการศึกษากันมานานจนกระทั่งเทคโนโลยีของ Si[3] ได้พัฒนาจนเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.12 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งต่ำไปเล็กน้อยและมีลักษณะแถบพลังงานเป็นแบบเฉียงทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้น้อย GaAs มีช่องว่างแถบพลังงาน 1.43 อิเล็กตรอนโวลต์ ลักษณะแถบพลังงานเป็นแบบตรง ทำให้ดูดกลืนพลังงานแสงได้ดีแต่ราคาสูง จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาสารกึ่งตัวนำกันเรื่อยมาจนได้สารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจนั่นคือ สารประกอบ ซัลโคไพไรท์ (chalcopyrite compounds) อยู่ในกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> โดยเฉพาะ CuInSe<sub>2</sub> มีลักษณะแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งยังสามารถทำให้มีชนิดการนำไฟฟ้าได้ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี ด้วยการแอนนีส (anneal) หรือการโด๊ป (dope) ซึ่งทำให้ CuInSe<sub>2</sub> เป็นสารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจและได้รับการพัฒนาจนได้ประสิทธิภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สิ่งสำคัญคือจะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ โดยที่รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้านั้นจะต้องมีความต้านทานน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งถ้าหากว่าความต้านทานที่รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำมีค่ามากนั้นจะทำให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ เราจึงได้ทำการศึกษารอยต่อที่มีคุณสมบัติทำให้ความต้านทานบริเวณรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยที่สุดนั้นก็คือรอยต่อแบบโอห์มมิกนั่นเอง ในการศึกษารอยต่อชนิดนี้จะใช้  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น และโลหะที่จะใช้ทำขั้วไฟฟ้าควรจะมีคุณสมบัติ

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. ยึดติดกับอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ที่ดี
3. ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน
4. เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย

โลหะที่เลือกใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษารอยต่อโอห์มมิกของ  $\text{CuInSe}_2$  ในโครงงานพิเศษนี้คือ In โดยมีขั้นตอนของการดำเนินงานนี้คือ

1. ศึกษาเทคนิคการสร้างเตาไฟฟ้าโชนเดี่ยวที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 700 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ในการแอนนัลสารภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย
2. เตรียมสารประกอบ  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยวิธีโคเรกชันนัล ฟรีซซิง โดยลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียง 5 องศากับแนวราบ
3. นำสารที่เตรียมได้มาทำการขัดผิวหน้าพร้อมทั้งทำความสะอาดผิวหน้าของผลึกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยสารละลายเคมี
4. ทดสอบชนิด (type) และสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity)
5. สร้างรอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมและโลหะผสมของอินเดียม(In-Pb และ In-Sn-Cd)กับผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  โดยวิธีการกดโลหะผสมดังกล่าวลงบนสารกึ่งตัวนำเบาๆแล้วทำการแอนนัลบริเวณรอยต่อ
6. สร้างรอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมกับฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  โดยวิธีการกดโลหะลงบนฟิล์มสารกึ่งตัวนำเบาๆแล้วทำการแอนนัลบริเวณรอยต่อ
7. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโอห์มมิกในช่วงอุณหภูมิ 77 - 300 องศาเคลวิน
8. จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างรอยต่อโอห์มมิกนี้เราใช้เป็นการวิธีการแอนนیلเพื่อให้กำแพงศักย์ที่รอยต่อบางลงซึ่งจะทำให้ความต้านทานเฉพาะของรอยต่อมีค่าน้อย โดยเราจะศึกษาว่าช่วงอุณหภูมิในการทำการ แอนนیلให้ได้รอยต่อโอห์มมิกที่ดี เพื่อที่จะนำไปใช้วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ต่อไปได้ จากการศึกษาสมบัติรอยต่อที่อุณหภูมิ 77-300 องศาเคลวิน จะทำให้เราสามารถหาค่าพลังงานไอออไนซ์ (Ionization energy) ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่เรานำไปประยุกต์ใช้งานด้านการควบคุมสมบัติการนำไฟฟ้าของสารได้ต่อไป ในวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

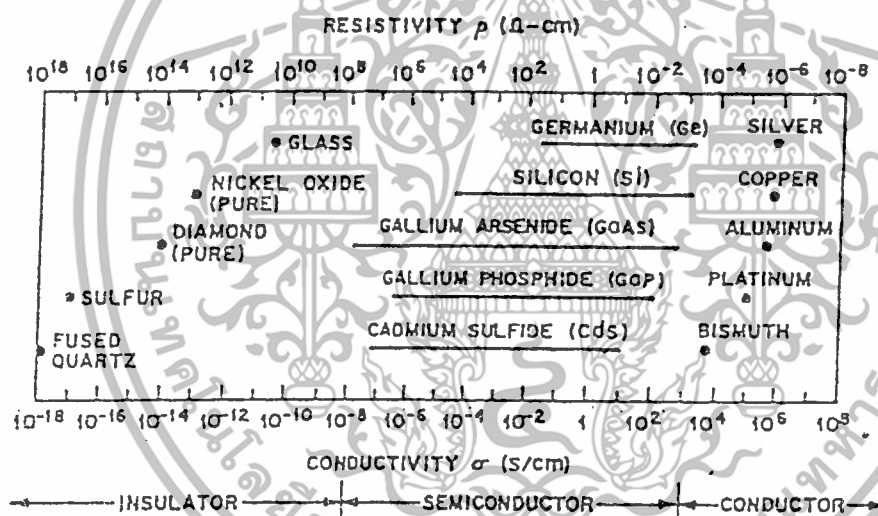


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### สารกึ่งตัวนำ

ที่อุณหภูมิห้องสสารโดยทั่วไปจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า( $\rho$ )อยู่ในช่วง  $10^{-6}$  -  $10^{12}$  โอห์ม-เซนติเมตร ดังนั้นเราจึงนำสมบัติดังกล่าวมาจำแนกประเภทของสสารโดยเรียงลำดับตามค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากน้อยไปมากได้ดังนี้ คือ โลหะ กึ่งโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน ซึ่งสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $10^{-3}$  -  $10^6$  โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งจะมีสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [2]



รูปที่ 2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน[3]

นอกจากนี้เรายังทราบว่าสารกึ่งตัวนำนี้มีสมบัติที่แตกต่างจากสารประเภทอื่น ดังนี้คือ[3]

1. มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนความต้านทานตามอุณหภูมิเป็นลบ (negative temperature coefficient of resistance) กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

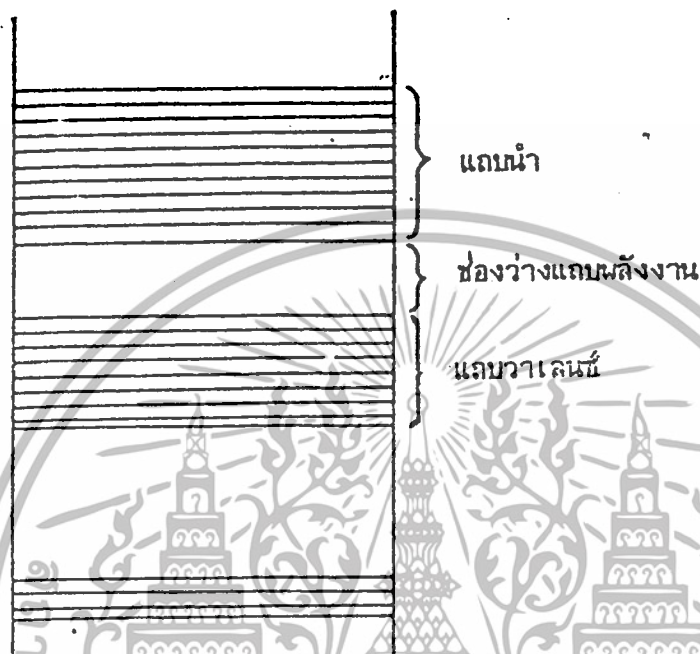
2. สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสตรง (rectifying effects)
3. สามารถตอบสนองต่อแสง คือ เมื่อมีแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นและความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้
4. ให้กำลังทางไฟฟ้าเนื่องจากความร้อนมีค่าสูง (high thermoelectric power)
5. สามารถได้ปได้ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนไป
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกเป็นแบบพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) แม้ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

สมบัติเหล่านี้สามารถอธิบายได้ดังทฤษฎีแถบพลังงาน สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกอะตอมของสารจะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้สนามศักย์ของอะตอมในผลึกมีลักษณะเป็นคาบ (periodic potential) เหมือนแลตทิซ (lattice) ของผลึก พฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ในผลึกที่มีสนามศักย์ดังกล่าว อธิบายได้ด้วยกลศาสตร์ควอนตัมโดยใช้ทฤษฎีของบลอค (Block's theorem) [4] จากแบบจำลองง่าย ๆ ของโครนิคและเพนนี่ (Kronig and Penny model)[5]ซึ่งสามารถอธิบายการเคลื่อนที่และพฤติกรรมของอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี ในแบบจำลองนี้อิเล็กตรอนของอะตอมทั้งหมดในผลึกจะจัดตัวอยู่ในแถบพลังงานผลึกซึ่งประกอบด้วยอะตอมมากมาย ระดับพลังงานที่อนุญาตให้อิเล็กตรอนอยู่ได้ของระบบจะเป็นระดับพลังงานของแต่ละอะตอมและอะตอมแต่ละตัวพลังงานเหมือนกันจึงทำให้ระดับพลังงานของระบบทรุดลง (degenerated) เมื่อพิจารณาเฉพาะระดับพลังงานชั้นในสุดของอะตอม เมื่อให้อะตอมเข้าใกล้กันมากขึ้นๆ อะตอมเหล่านี้จะมีอิทธิฤทธิ์ต่อกัน จะมีผลทำให้ระดับพลังงานของระบบที่เดิมนั้นทรุดแบบ N-fold degenerate แยกตัวออกเป็น N ระดับชั้นเกิดเป็นแถบของพลังงานขึ้น ทำนองเดียวกันสำหรับระดับพลังงานชั้นถัดมาของอะตอมซึ่งแยกตัวออกเป็นแถบพลังงานอีกแถบอยู่ถัดมา โดยมีช่องว่างกันอยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง ช่องว่างนี้เป็นบริเวณต้องห้ามที่อิเล็กตรอนไม่สามารถมีค่าพลังงานอยู่ในช่วงนี้ได้ซึ่งเรียกว่า “ช่องว่างแถบพลังงาน(energy gap)”

ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ แถบพลังงานของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เรียกว่า “แถบวาเลนซ์” แถบพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย และอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “แถบนำ” ซึ่งจะมีช่องว่างที่เป็นบริเวณต้องห้าม ที่อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถมีค่าพลังงานอยู่ในช่วงนี้ได้ ช่องว่างนี้เรียกว่า “ช่องว่างแถบพลังงาน” ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแถบพลังงานที่อนุญาตให้อิเล็กตรอนมีค่าได้ของเลขทศที่มีลักษณะเป็นคาบ[3]

แถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ สามารถใช้แบ่งชนิดของสารได้เช่น โลหะ สารกึ่งตัวนำ และ ฉนวน ตามทฤษฎีของแถบพลังงาน ฉนวน คือ ของแข็งที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กทรอนิกส์บรรจุอยู่เต็มส่วนแถบนำจะว่างเปล่า และมีช่องว่างแถบพลังงานขนาดใหญ่ สำหรับโลหะ แถบวาเลนซ์และแถบนำจะเหลื่อมล้ำกัน ส่วนสารกึ่งตัวนำนั้นปรกติในแถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กทรอนิกส์บรรจุอยู่ หรืออาจมีอยู่น้อยมาก ช่องว่างแถบพลังงานไม่กว้างนัก ซึ่งในกรณีของสารกึ่งตัวนำ ความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานมีความสำคัญต่อการเข้าใจสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

## 2.1 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ[3]

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่ถูกนำไปใช้ทำเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อที่จะเข้าใจการทำงานของสารกึ่งตัวนำ จึงจำเป็นต้องศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกตลอดจนวิธีการเตรียมผลึก เพื่อให้ได้ผลึกที่มีลักษณะ โครงสร้างผลึกที่เหมาะสมตามที่ต้องการจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเหตุให้มีการนำธาตุ ตั้งแต่สองธาตุขึ้นไปมาผสมกันเพื่อให้ได้โลหะผสมสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างที่เกิดจากการจับกันของอะตอม ซึ่งเป็นพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) เหมือนเพชร แต่มีสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ แตกต่างกันไปจาก เพชร

ดังนั้นพวกสารกึ่งตัวนำจึงอาจประกอบขึ้นด้วยธาตุเพียงธาตุเดียวเสมอหรือหลายธาตุก็ได้

## 2.2 โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ[3]

แม้ว่าสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้จะมีลักษณะของพันธะเป็นแบบพันธะสี่หน้าก็ตามแต่เนื่องจากสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้มีทั้งชนิดที่เป็นธาตุเดี่ยวและที่มีจำนวนหลายธาตุรวมกันอยู่จึงเป็นผลให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้า[3]

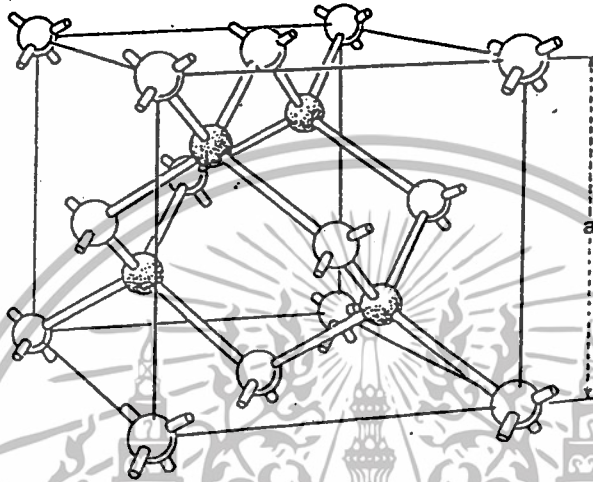
ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างผลึกที่มีพันธะเป็นแบบพันธะสี่หน้าออกเป็นหลายแบบ คือ

### 2.2.1 โครงสร้างแบบเพชร (diamond structure)[3]

โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ  $\alpha$ -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างแบบเพชรนี้เกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face-centered cubic lattices,  $a=b=c$  ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง  $\frac{1}{4}$  ของเส้นทะแยงมุมหนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นชนิดเดียวกับอยู่ที่ตำแหน่ง  $000, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}$  และ  $0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปลูกบาศก์ซึ่งบิดเบี้ยวได้มาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวน โครงสร้างทั้งหมดของกลุ่มนี้



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพชร

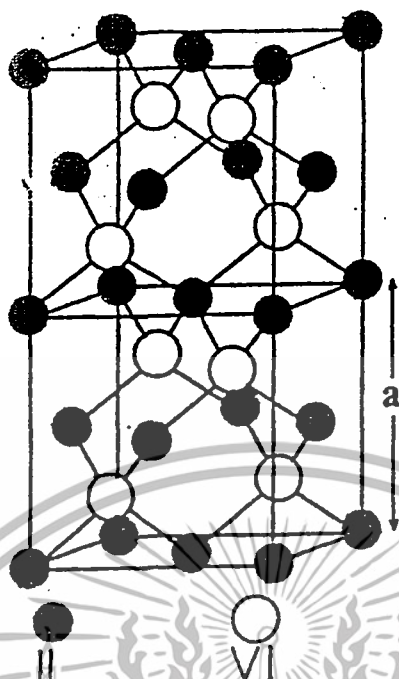
### 2.2.2 โครงสร้างแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure)[3]

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบนี้ได้แก่ สารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V และ II-VI โครงสร้างแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างแบบเพชรต่างกันตรงที่แต่ละโครงผลึกเฟสเจ็นเตอร์คิวบิก ซ้อนเหลื่อมกันนั้นเป็นอะตอมของธาตุแต่ละชนิดในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิด แต่ละชนิดมีสี่อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs

อะตอมของ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง  $000, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}$

อะตอมของ As อยู่ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$  และ  $\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}$

ปลายแกน Ga จะมี As จับอยู่ที่สี่อะตอมและปลายแกน As จะมี Ga จับอยู่ที่สี่อะตอมเช่นเดียวกัน ดังนั้น โครงผลึกแบบนี้ยังคงเป็นรูปลูกบาศก์อยู่แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างแบบเพชร



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์[3]

### 2.2.3 โครงสร้างแบบชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite structure)[6]

โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างของสารประกอบสารกึ่งตัวนำเชิงสามซึ่งได้แก่กลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> และ II-IV-V<sub>2</sub> โครงสร้างแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (ชนิดกลุ่ม III-VI และ III-V ตามลำดับ) โดยการขยายหน่วยเซลล์ของซิงค์เบลนด์ออกเป็นสองเท่าตามแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์ของชาลโคไพไรต์จึงเป็นสองเท่าของซิงค์เบลนด์และมีสี่หกอะตอม ตัวอย่างเช่นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ในโครงสร้างผลึกเพนเตกอนัลทวิวิกัลอันหนึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุในกลุ่ม I และ III เรียงสลับกันตามแนวแกน c และโครงสร้างอีกอันหนึ่งมีเฉพาะอะตอมของธาตุกลุ่ม VI เรียงอยู่ในหนึ่งเซลล์จำนวนและตำแหน่งอะตอมของธาตุต่าง ๆ มีดังนี้คือ

ธาตุกลุ่ม I มีสี่อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง  $000, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}$

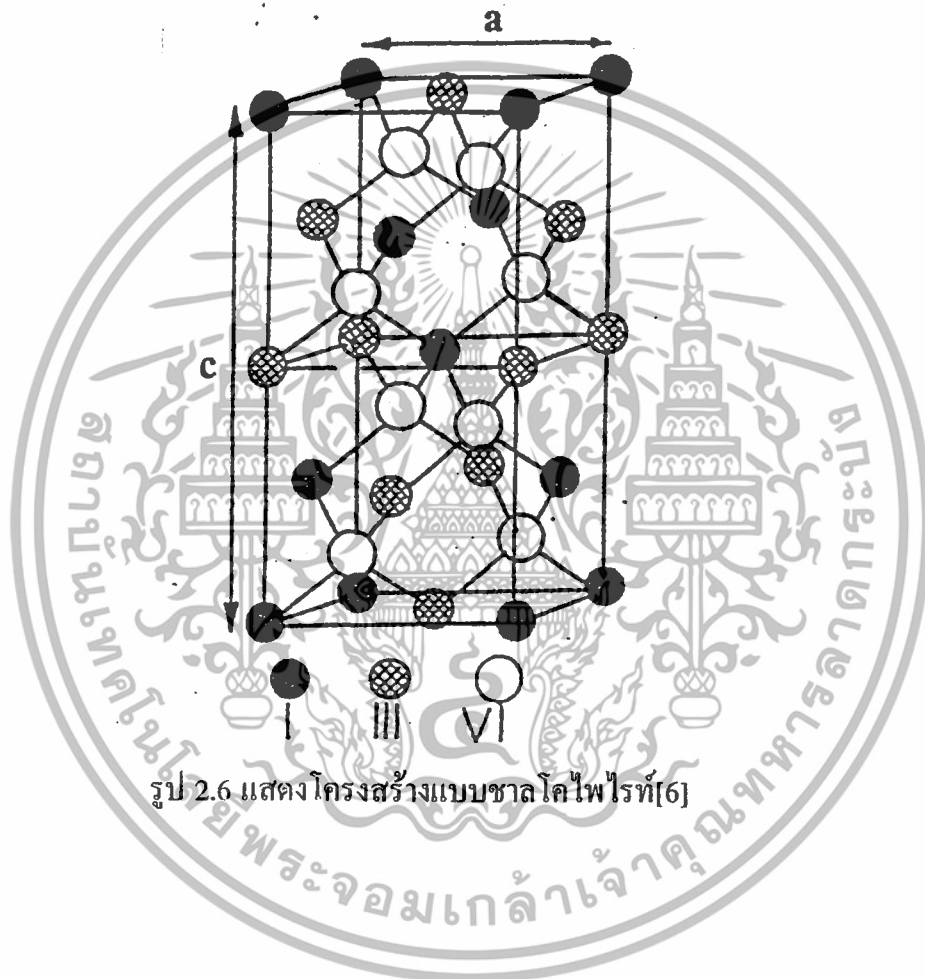
ธาตุกลุ่ม III มีสี่อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง  $00\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}$

ธาตุกลุ่ม VI มีแปดอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง

$$u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}, u\frac{1}{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $u = \frac{1}{4} + x = \bar{u} = \frac{3}{4} + x$  และ  $x$  คือการเลื่อนของแอนไอออน(anion displacement) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่อะตอมของธาตุกลุ่ม VI จับกับอะตอมของธาตุกลุ่ม I และกลุ่ม III อย่างละ 2 อะตอม จึงทำให้ความยาวของพันธะ(bond length) ไม่เท่ากัน และจากการเกิด  $x$  นี้จะส่งผลให้  $\frac{c}{a}$  มีค่าต่างจากสองเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### สมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์

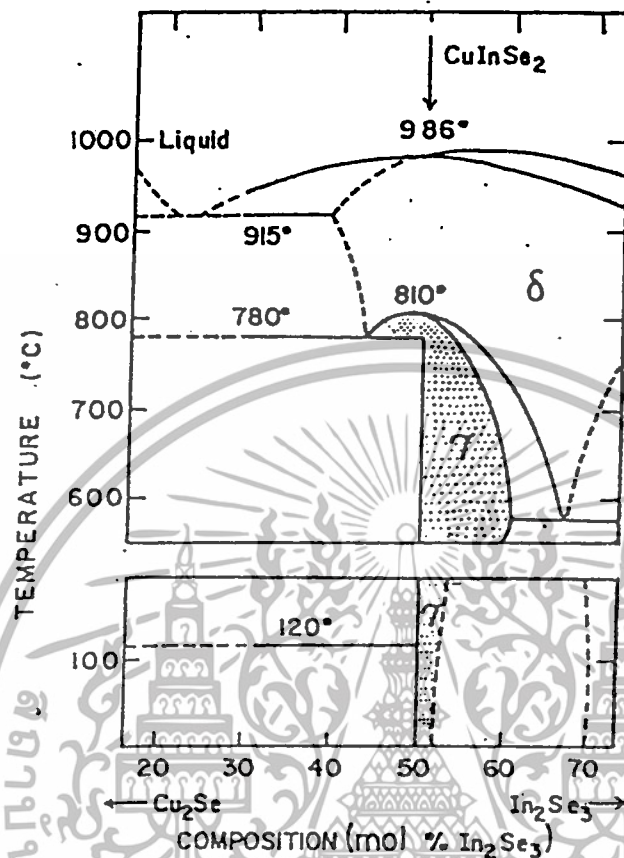
ในระยะเริ่มแรกการศึกษาสารกึ่งตัวนำกลุ่มซัลโคไฟไรท์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านสมบัติที่แตกต่างไปจากสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นที่รู้จักกันในขณะนั้นกล่าวคือ มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนอล (tetragonal system) จึงทำให้สมบัติเชิงแสง (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีสมบัติพิเศษคือปรากฏการณ์ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringent) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนความถี่แสง ขณะเดียวกับสมบัติอื่น ๆ ก็ได้รับการศึกษาไปในแนวทางเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป

#### 3.1 เฟสไดอะแกรม (phase diagram)[3]

สารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ส่วนใหญ่จะ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น โดยตรง (direct synthesis) ระหว่างธาตุ Cu , In และ Se โดยมีสัดส่วนอะตอมเป็น 1:1:2 การศึกษาสารประกอบระหว่างธาตุทั้งสามในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่าที่สัดส่วนดังกล่าวหรือที่เรียกว่า สโตยคิโอเมตริกและสัดส่วนใกล้เคียงกัน (near stoichiometry) สารประกอบนี้จะอยู่ในเฟสเดียวกัน

เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se ได้รับการศึกษามาแล้วค่อนข้างละเอียด โดยอาศัยเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม (pseudo-binary phase diagram)[7] ระหว่าง  $\text{Cu}_2\text{Se}$  กับ  $\text{In}_2\text{Se}_3$  ดังรูป 3.1

โดยจะเห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 986 องศาเซลเซียส  $\text{CuInSe}_2$  จะเปลี่ยนจากสภาพหลอมเหลวเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นซิงค์เบลนด์ ( $\delta$ -phase) หรือที่เรียกว่า โครงสร้างแบบคิวบิกเทียม (pseudo cubic phase) แคทไอออน (cation) ประกอบด้วย Cu กับ In จะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในตำแหน่งซับแลตทิซของแคทไอออน (cation sublattice) แต่จะอยู่ในลักษณะกระจายสุ่ม ที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส โครงสร้างจะเปลี่ยนจากซิงค์เบลนด์ไปเป็นซัลโคไฟไรท์ ( $\gamma$ -phase)



รูป 3.1 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se[3]

### 3.2 การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ[8]

ปัญหาในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ก็คือการเตรียมสารให้ได้ขนาดใหญ่พอสำหรับการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้ โดยทั่วไปนิยมเตรียมสารด้วยวิธีไดเรกชันเนลฟรีซซิง (directional freezing) ซึ่งปัญหาที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการเตรียมผลึกด้วยวิธีนี้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความดันไอ (vapour pressure) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ Se ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $217^\circ\text{C}$  และปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่าง In ที่หลอมเหลวกับ Se ในสถานะแก๊ส ซึ่งจะเป็นเหตุให้หลุดแตกในกรณีที่หลอมปิดหลอด (sealed) ไม่ดีพอ
2. สารประกอบที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneities) ทั้งด้านองค์ประกอบ (composition) และชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) และขนาดใหญ่ (bulk cracks) รวมทั้งผลึกแฝด (twins) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิเตาด้วยอัตราเร็วเกินไป
4. ช่องว่าง (voids) มักเกิดขึ้นในเนื้อสารและบริเวณที่สัมผัสกับผิวด้านในของหลอดแก้วควอทซ์

โดยทั่วไปการเตรียมผลึกด้วยวิธีใดเรกซ์นัล ฟริชซิงนี้มักจะให้ปลายของภาชนะที่ใช้เป็นมุมกรวยแหลม เพราะเชื่อว่าในส่วนนี้จะเป็นจุดกำเนิดของนิวคลีเอชัน (nucleation) และผลึกที่เกิดขึ้นในส่วนถัดไปจะเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อน โดยมีลักษณะโครงสร้างเหมือนนิวคลีเอชัน

เพื่อแก้ไขสารที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงเลือกให้ผลึกพหุพันธ์เป็นสารตั้งต้น ส่วนช่องว่าง (voids) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของสารตัวอย่างที่สัมผัสกับหลอดเตรียมสารสามารถแก้ไขได้โดยก่อนนำหลอดมาใช้เตรียมสารจะต้องล้างด้วยสารละลายเคมีและอบให้แห้งด้วยอุณหภูมิสูง และหลอมสารที่อุณหภูมิ  $1080^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ขณะที่หลอมจะต้องหมุนหลอดเป็นระยะๆ เพื่อช่วยให้สารหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้ดียิ่งขึ้น เงื่อนไขที่สำคัญที่สุดก็คือช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงจะต้องใช้อัตราเร็วในการลดอุณหภูมิอย่างเหมาะสม ต่อจากนั้นอาจจะเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิให้เร็วขึ้น

### 3.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติในการนำไฟฟ้า

ส่วนใหญ่สภาพนำไฟฟ้าของสารประกอบกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่า 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ [9] โดยเฉพาะ  $\text{CuInSe}_2$  สามารถที่จะเปลี่ยนจากชนิดที่เป็นชนิดเอ็นได้ โดยการแอนนัล (anneal) ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งในการเปลี่ยนชนิดของสารจะทำให้ความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสภาพเคลื่อนได้ (mobility) เปลี่ยนแปลงไป

นอกจากการแอนนัลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าแล้วยังสามารถทำให้เกิดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ด้วยการแอนนัลที่อุณหภูมิต่ำในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 8-10 นาที) [10] การเตรียม  $\text{CuInSe}_2$  โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอะตอมไปจากสตอยคิโอเมตริเล็กน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของการนำไฟฟ้าและจำนวนของพาหะอิสระ เช่นถ้ามี Se มากเกินไปเล็กน้อยจะได้สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี และถ้า In มากเกินไปเล็กน้อยจะเป็นชนิดเอ็น [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่มีการเปลี่ยนแปลง ได้ทั้งชนิดและสภาพนำไฟฟ้าจากการแอนนีสในลักษณะต่าง ๆ ดังกล่าว อาจจะเป็นเนื่องมาจากเกิดข้อบกพร่องขึ้นภายในผลึกในขณะที่แอนนีส

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของพลังงานที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องชนิดต่าง ๆ ของผลึก  $\text{CuInSe}_2$  [12]

Defect type		Formation energy(eV)
Vacancies	$V_{\text{Se}}$	2.4
	$V_{\text{Cu}}$	2.6
	$V_{\text{In}}$	2.8
Interstitials	$\text{Cu}_i$	4.4
	$\text{In}_i$	9.1
	$\text{Se}_i$	22.4
	Antisites	
	$\text{In}_{\text{Cu}}$	1.4
	$\text{Cu}_{\text{In}}$	1.5
	$\text{In}_{\text{Se}}$	5.0
	$\text{Se}_{\text{In}}$	5.5
	$\text{Se}_{\text{Cu}}$	7.5
	$\text{Cu}_{\text{Se}}$	7.5

### 3.4 การทำความสะอาดผิวหน้าผลึก[8]

การที่จะนำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปศึกษาในขั้นต่อไปต้องคำนึงถึงความสะอาดเรียบและความสมบูรณ์ของผิวผลึก โดยเฉพาะการนำไปใช้พื้นฐานรอง (substrate) เพื่อปลูกชั้นผลึก (Epitaxial layer) ที่มีคุณภาพดีทับลงไป ซึ่งจะนำเอาไปใช้ทำเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง การทำความสะอาดผิวหน้าผลึกเป็นปัญหาที่สำคัญที่จะมีผลต่อสิ่งประดิษฐ์นั้นโดยตรง แผ่นผลึกที่ตัดออกมาจากแท่งผลึก จะถูกนำไปขัดให้เรียบเป็นมันวาวด้วยผงขัดซิลิกอนคาไบด์ หรือผงขัดอลูมินา จากนั้นจึงนำไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายเคมี (chemical etching solution) ที่เหมาะสมเพื่อขจัดผิวหน้าส่วนที่ชำรุดเนื่องจากการขัด ชนิดของสารละลายเคมีและวิธีการที่ใช้กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ดังปรากฏในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ตารางที่ 3.2 แสดงชนิดของสารละลายเคมีและวิธีปฏิบัติเพื่อทำความสะอาดผิวหน้าผลึก**



สารละลายเคมี	ชนิดของ CuInSe <sub>2</sub>	วิธีปฏิบัติ
Br+CH <sub>3</sub> OH	n,p	ไม่กล่าวถึงรายละเอียด
HCl+HNO <sub>3</sub> (1:1)	p	กัดด้วยสารละลายเคมีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาที
HCl+HNO <sub>3</sub> (1:1)	p	อุ่นสารละลายเคมีให้ร้อน
HCl+HNO <sub>3</sub> (3:1) (aqua-regia)	p	ใช้เวลาในการกัดผิว 10-30วินาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวนมาก

**3.5 การทำรอยต่อแบบโอห์มมิก**

สิ่งจำเป็นพื้นฐาน ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำคือจะต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อที่เกิดขึ้นจากโลหะ(ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า) สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ จะต้องไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking current) รอยต่อดังกล่าวนี้เรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มมิก วัสดุที่ใช้ในการทำรอยต่อรวมถึงวิธีปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก ดังปรากฏในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบ โอห์มมิกของ CuInSe<sub>2</sub>[3]**

วัสดุที่ใช้	ชนิดของCuInSe <sub>2</sub>	วิธีการปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก
Au	p	ระเหย Au ขึ้นไปเคลือบแผ่นผลึกในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงวัสดุและวิธีปฏิบัติในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ  $\text{CuInSe}_2$  (ต่อ)

วัสดุที่ใช้	ชนิดของ $\text{CuInSe}_2$	วิธีการปฏิบัติเพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิก
Au , Cr	p	ระเหย Cr ในระบบสุญญากาศขึ้นไปเคลือบบนแผ่นผลึกให้ได้ความหนา $70^\circ\text{A}$ จึงระเหย Au เคลือบทับอีกชั้นด้วยความหนา $50^\circ\text{A}$
Au	p	สปัตเตอร์ริง(sputtering) Au ลงบนแผ่นผลึก
Au	p	กต Au ชั้นเล็กๆ ให้ติดแน่นบนผิวผลึกที่ทำ
Au	p	ความสะอาดแล้ว
Au	p	นำแผ่นผลึกที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วจุ่มลงในสารละลาย $\text{AuCl}_3$ ที่มีอุณหภูมิ $50-70^\circ\text{C}$ จนกระทั่ง Au เคลือบบนแผ่นผลึกหนาพอสมควร
Al	p	ขัดแผ่น โลหะด้วยกระดาษทรายแล้วป้ายด้วยกาวนำไฟฟ้า (silver paint) ก่อนที่จะนำไปเชื่อมกับลวดอลูมิเนียม
Ni	n , p	กตด้วย Ni ชั้นเล็กๆ ให้ติดแน่น
In	n	ให้แผ่นผลึก $\text{CuInSe}_2$ มีอุณหภูมิ $200^\circ\text{C}$ ภายในระบบสุญญากาศความดันต่ำ $1 \times 10^{-5}$ torr แล้วระเหย In ขึ้น ไปเคลือบหนา $50^\circ\text{A}$
In-Sn	n	ปล่อยให้เย็น 2-3 นาที จึงลดอุณหภูมิลง สปัตเตอร์ริง โลหะผสม In-Sn ลงบนแผ่นผลึก
In-Zn	n	ระเหย โลหะผสม In-Zn เคลือบบนแผ่นผลึกในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำจากสภาวะหลอมเหลว

การเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะเหมาะสมกับเทคนิคบางอย่างเท่านั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งข้อบกพร่องของผลึก (crystal defects) ต้องน้อยที่สุด เนื่องจากว่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (imperfections) และสิ่งเจือปน (impurity) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) และช่วงชีวิต (lifetime) ของพาหะอิสระ (free carriers) อันจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนั้นการควบคุมชนิดและปริมาณของความไม่สมบูรณ์ของผลึกจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง

การเตรียมผลึกจากสภาวะหลอมเหลวมีมากมายวิธีที่กระทำทั้งในระบบเปิดและระบบปิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันไอของธาตุในขณะหลอมเหลว ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเตรียมผลึกในระบบปิดแบบไดเรกชันนัล ฟรีซซิง โดยวิธีบริดจ์แมน (Bridgman method) และวิธีลดอุณหภูมิ (temperature gradient freezing method) เหตุที่ใช้ระบบปิดเนื่องจากความดันไอสูงและเพื่อป้องกันการสูญเสียธาตุที่มีความดันไอสูงอันจะทำให้สารตัวอย่างที่เตรียมได้มีสมบัติต่างไปจาก สโตยคิโอเมตริกที่ต้องการ

#### 4.1 การเตรียมผลึกในระบบปิดแบบไดเรกชันนัล ฟรีซซิง [13]

ในการเตรียมสาร ให้นำภาชนะเข้าไปวางภายในเตา ตามตำแหน่งที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิของเตาให้สูงขึ้นจนสารภายในภาชนะหลอมเหลว ปล่อยให้สารหลอมระยะเวลาหนึ่งพร้อม ๆ กันนี้ คนหลอดภาชนะเพื่อให้สารหลอมเป็นหนึ่งเดียวกันดีขึ้น จึงเริ่มลดอุณหภูมิลงช้า ๆ ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสม สารจะเริ่มเย็นจากปลายด้านหนึ่งที่แหลมของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่ง จนแข็งเป็นแท่งตามรูปร่างของภาชนะ ที่ปลายแหลมจะก่อให้เกิดนิวเคลียส (nucleation) ของผลึกเอกพันธ์ขึ้นก่อน แล้วส่วนอื่นจะเกิดตามมาจนเป็นผลึกเอกพันธ์ตลอดทั้งแท่ง หากเลือกภาชนะที่ไม่เหมาะสมแล้วสารที่กำลังหลอมเหลวอาจทำปฏิกิริยากับผนังของภาชนะ ทำให้ผลึกที่เตรียมได้มีสิ่งเจือปนหลุดออกมาจากภาชนะกลายเป็นสารอสุทธิขึ้น ในเนื้อผลึกทำให้ผลึกเอกพันธ์เกิดขึ้นพร้อมกันหลายแห่งอันเป็นเหตุทำให้ได้แท่งสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยผลึกเอกพันธ์ (single grains) หลายเกรนที่เราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

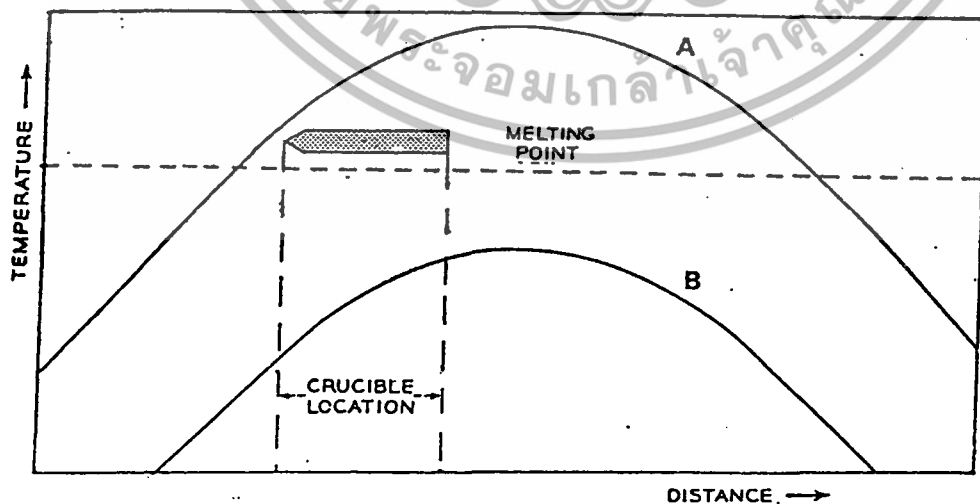
ไม่ต้องการทั้งยังมีแนวโน้มที่จะทำให้ผลึกติดแน่นกับผนังของภาชนะในขณะที่ลดอุณหภูมิของเตาให้ต่ำลง แท่งผลึกที่เตรียมได้จะมีรอยแตกร้าว (bulk cracks)

การเตรียมผลึกในระบบปิดแบบโคเรกชันนัล ฟริซซิงมี 2 วิธี คือ วิธีบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์ (Bridgman-Stockbarger method) [13,14] กับ วิธีลดอุณหภูมิ (temperature gradient freezing method)[13,15]

#### 4.1.1 วิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์ (Bridgman-Stockbarger method)[16]

หลักการโดยทั่วไปของการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำด้วยวิธีของบริดจ์แมน คือ การให้ภาชนะที่บรรจุธาตุหรือสารประกอบตั้งต้นเคลื่อนที่ผ่านเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (temperature gradient) ภายในเตาจากส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารนั้น ไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวด้วยอัตราที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ การเลือกใช้ขนาดของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิก็น่าจะเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก จากวิธีดังกล่าวถ้าใช้การเคลื่อนที่ของเตาแทนที่จะเลื่อนภาชนะลง ซึ่งภาชนะนั้นจะต้องอยู่นิ่งในตำแหน่งที่เหมาะสมในขณะที่เตาเลื่อน วิธีนี้จะเรียกว่าวิธีของสโตคบาเกอร์ โดยทั่วไปจะเห็นว่าทั้งสองวิธีให้ผลเกือบเหมือนกัน ดังนั้นจึงนิยมเรียกวธีการเตรียมผลึกทั้งสองวิธีนี้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอนไม่ว่าจะเป็นการเลื่อนเตาหรือเลื่อนภาชนะว่าวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์

เตาโซนเดียวที่ใช้ในการเตรียมผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์จะมีลักษณะของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิดังแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณตรงกลางเตาจะเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดและจะค่อย ๆ ต่ำลงไปตามยาวสู่ปลายเตาทั้งสองข้างเส้นโค้ง A และ B แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (temperature profile) ซึ่งอุณหภูมิตรงกลางเตาตามโปรไฟล์ B จะต่ำกว่า A ถ้ากำหนดให้เส้นประในรูปที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารที่จะใช้เตรียมเป็นผลึก โดยให้โปรไฟล์ของอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลองเป็นไปตามเส้นโค้ง A และภาชนะบรรจุสารที่กำลังหลอมเหลวจะอยู่บริเวณกลางเตา หลังจากใช้เวลาในการหลอมสารระยะหนึ่งจึงเลื่อนภาชนะไปทางด้านซ้ายของรูปที่ 4.1 อย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ สารที่อยู่ในส่วนปลายแหลมของภาชนะจะเริ่มแข็งตัวเป็นผลึกก่อนในขณะที่ผ่านจุดตัวระหว่างโปรไฟล์ A กับเส้นประจนกระทั่งภาชนะผ่านพ้นจุดนี้ไปแล้วสารจึงจะแข็งตัวทั้งหมด

#### 4.1.2 วิธีลดอุณหภูมิ (temperature gradient freezing method)[17]

วิธีลดอุณหภูมิเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงอัตราการเลื่อนภาชนะหรือเลื่อนเตาตามวิธีของบริดจ์แมน-สโตคบาเกอร์ แต่สิ่งสำคัญก็คือการเลือกใช้เตาโซนเคียวที่มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการเตรียม อีกทั้งเกรเดียนต์ของอุณหภูมิกวรมีค่าคงที่แม้ว่าอุณหภูมิของเตาจะเปลี่ยนจากโปรไฟล์ A ไปเป็นโปรไฟล์ B แล้วก็ตาม (ดังรูปที่ 4.1)

ภาชนะบรรจุสารอยู่ที่ตำแหน่งกลางเตาซึ่งอุณหภูมิสูงที่สุดในภาชนะจะหลอมเหลวหมด หลังจากใช้เวลาในการหลอมสารระยะหนึ่ง จึงเลื่อนภาชนะไปทางด้านซ้ายมือ ณ ตำแหน่งดังรูป 4.1 จึงเริ่มลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราที่เหมาะสม โดยรู้ได้จากเฟสไดอะแกรมของสารนั้น เมื่อลดอุณหภูมิลงไปถึงโปรไฟล์ สารจะแข็งตัวเป็นแท่ง เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ดังนั้นขณะที่ลดอุณหภูมิจากโปรไฟล์ A ไปยังโปรไฟล์ B อย่างช้า ๆ สม่ำเสมอสารในภาชนะจะเย็นตัวลงจากด้านปลายแหลมสู่ปลายอีกด้านหนึ่ง จนกระทั่งแข็งตัวหมด

#### 4.2 ข้อควรระวังในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ

ปัญหาใหญ่ในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  แบบเกรนผลึกเดี่ยว (single grain) ให้มีขนาดใหญ่พอสำหรับใช้ในกรณีศึกษาทั่วไปได้และยังยากที่จะเตรียมผลึกที่ปราศจากข้อ

บกพร่องผลึก (defect) อันเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการนำผลึกไปใช้เป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ปัญหาที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมผลึกด้วยวิธีไครเรชันนัล ฟริชซิง คือ

1. ออกแบบเตาที่เหมาะสม ให้ได้อุณหภูมิได้สูงพอ รวมทั้งสามารถควบคุมอัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิได้คงที่โดยอัตโนมัติ
2. ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมสาร ต้องมีค่าไม่มากเกินไปกว่าค่าอุณหภูมิที่หลอมแก้วควอทซ์จะทนได้ คือต้องน้อยกว่า 1583 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่เนื้อหลอมแก้วเริ่มหลอมเหลว
3. การเลือกใช้ภาชนะที่ใช้หลอมสาร ควรหลีกเลี่ยงวัสดุที่ใช้ทำภาชนะที่สามารถหลุดเข้าไปในเนื้อสาร
4. ต้องสูบเอาอากาศออกจากหลอดภาชนะให้มากที่สุดแล้วจึงหลอมปิดหลอด (sealed) ให้สนิทเพื่อมิให้ธาตุหรือสารประกอบทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก
5. ความดันไอที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ Se
6. พิจารณาว่าในขณะลดอุณหภูมิ มีการเปลี่ยนแปลงเฟสหรือไม่ และควรทราบค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transition temperature) ของสารนั้น เพื่อใช้ในการเลือกช่วงอัตราการลดอุณหภูมิของสารให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลึกขนาดใหญ่มีลักษณะโครงสร้างสมบูรณ์ตามต้องการ
7. หลังจากเตรียมผลึกได้แล้วอาจนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิหนึ่งในช่วงเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้อะตอมต่าง ๆ เกิดการจัดเรียงตัวจนกระทั่งอยู่ในสถานะสมดุล
8. สารประกอบที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneities)
9. รอยแยกขนาดเล็ก (microcracks) ขนาดใหญ่ (bulk cracks) และทวิน (twins)
10. ช่องว่าง (void) ที่มักเกิดในเนื้อสารและบริเวณที่สัมผัสกับผิวด้านในของหลอดแก้วควอทซ์
11. เกรนบาวนด์คาร์รี (grain boundary) ที่เกิดจากอัตราการลดอุณหภูมิเร็วเกินไปจะมีผลทำให้ค่าสภาพเคลื่อนได้ และค่าช่วงชีวิตของพาหะลดลง
12. สารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้มักจะมีธาตุเหล็กเป็นสารอสุทธิ (iron contaminant) ปนมาด้วยเสมอ

ปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่ต้องคำนึงอย่างมากในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาโครงสร้างของสารที่เตรียมได้โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์(X-ray diffraction) เป็นการศึกษาขั้นต้นที่สำคัญที่สุด เพื่อเป็นการยืนยันว่าสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากวิธีการเตรียมผลึกวิธีใดก็ตามมีโครงสร้างและความสมบูรณ์ของผลึกเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำผลึกก้อนตัวนั้นไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์อื่นต่อไป

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำและได้เน้นถึงโครงสร้างของสารประกอบซัลไฟด์โคไฟไรท์ ซึ่งเป็นแบบ เทตระโคนอล โครงสร้างของสารประกอบชนิดนี้แตกต่างจากสารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันทั่วไปซึ่งมักเป็นแบบคิวบิก ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของผลึกซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาค่าของโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมขึ้น

#### 5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากผลึก [18]

รังสีเอ็กซ์จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านตัวกลางต่าง ๆ ได้ดี โดยที่ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการหาค่าโครงผลึกควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 อังสตรอมถึง 3 อังสตรอม เมื่อรังสีเอ็กซ์ ตกกระทบผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนเพราะอิเล็กตรอนของอะตอมในผลึกสปีเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและให้พลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

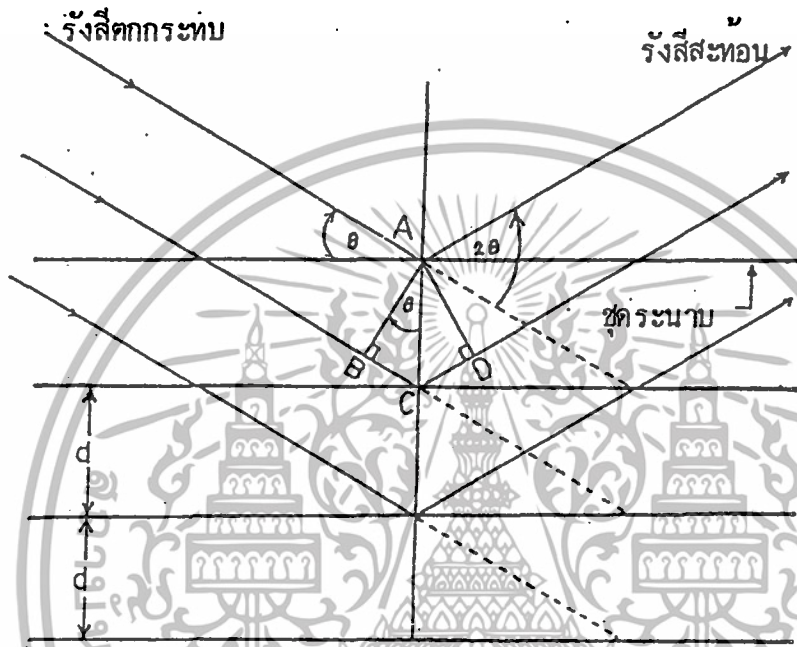
เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงผลึกอะตอมเหล่านี้จะกระเจิงรังสีเอ็กซ์ทำให้ดูเหมือนกับว่ารังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนระนาบแล้วเกิดการสะท้อนโดยที่ระยะห่างระหว่างระนาบเป็น  $d$  ให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบที่จุด A และ C เป็นมุม  $\theta$  แล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม  $\theta$  เท่าเดิม มุม  $\theta$  นี้จะเรียกว่ามุมแบรกก์ (Bragg angle) ดังรูปที่ 5.1

หน้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ซึ่งสะท้อนจากระนาบที่ต่างกันจะทำให้เกิดความแตกต่างของระยะทางเดินของคลื่นเท่ากับ  $BC+CD$  หรือเท่ากับ  $2d\sin\theta$  ในกรณีที่เกิดการเสริมกันของคลื่นแล้ว  $2d\sin\theta$  จะมีค่าเป็น  $n$  เท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (5.1)$$

เมื่อ  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  ตามลำดับ โดยเงื่อนไขดังกล่าวนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์



รูปที่ 5.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์[18]

## 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่โครงผลึก[19]

ผลึกประกอบด้วยระนาบชุดต่าง ๆ (the various sets of planes) เราเขียนสัญลักษณ์แทนระนาบแต่ละชุดได้ด้วยรูปแบบดังนี้คือ  $(hkl)$  ซึ่ง  $h$ ,  $k$  และ  $l$  เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่  $0, 1, 2, \dots$  ซึ่งจะเรียกตัวเลขชุดเหล่านี้ว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์  $(h, k, l)$  และค่าคงที่โครงผลึก  $(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$  ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกของระบบผลึก (crystal systems) แบบต่าง ๆ ปรากฏอยู่ในหนังสือที่เกี่ยวกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ทั่วไป

สำหรับผลึกที่จัดอยู่ในระบบเททราโกนอล (tetragonal system) โดยมี  $a=b \neq c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  ดังเช่น  $\text{CuInSe}_2$  ที่เรากำลังศึกษาอยู่นี้ พบว่ามีความสัมพันธ์คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเรารวมสมการที่ 5.1 โดยให้  $n=1$  กับสมการที่ 5.2 แล้วจะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a,c$ ) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $h,k,l$ ) ตามสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.3)$$

### 5.3 ความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเนื่องจากระนาบต่าง ๆ ในผลึก[19]

การศึกษาความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน ( $I$ ) เนื่องจากระนาบต่าง ๆ ในผลึกจะเป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงชนิดของ โครงสร้างผลึกและรายละเอียดภายในหน่วยเซลล์ (unit cell) ตำแหน่งและชนิดของอะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในหน่วยเซลล์มีอิทธิพลต่อความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนและทิศทางการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยเริ่มต้นพิจารณาความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกกระเจิงด้วยอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจนถึงอะตอมหนึ่งอะตอมและอะตอมต่าง ๆ ภายในหน่วยเซลล์ ตามลำดับ พบว่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบนเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$I \propto |F|^2 |pL| \quad (5.4)$$

เมื่อแฟกเตอร์พหุคูณ (multiplicity factor,  $p$ ) คือจำนวนของระนาบเลี้ยวเบนที่ต่างกัน แต่เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ค่าเดียวกัน ค่าแฟกเตอร์พหุคูณนี้ขึ้นอยู่กับสมมาตรของผลึก (crystal symmetry) และดัชนีมิลเลอร์ของระนาบสะท้อน (Miller indices of reflecting plane)

แฟกเตอร์ลอเรนซ์-โพลารีเซชัน ( $L$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับมุมของแบรกก์ ( $\theta$ ) ดังสมการ

$$L = \frac{1 + \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} \frac{2\theta}{\cos \theta} \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แฟกเตอร์โครงสร้าง (F) คือคลื่นลัพธ์ของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกกระเจิงออกมาจากอะตอมทั้งหมดของหน่วยเซลล์ของผลึก ดังนั้นแฟกเตอร์โครงสร้างขึ้นอยู่กับชนิดของผลึกตลอดจนตำแหน่งของอะตอมต่าง ๆ ภายในหน่วยเซลล์ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าแฟกเตอร์โครงสร้างยังขึ้นอยู่กับสมบัติการกระเจิงของอะตอมที่เรียกว่าแฟกเตอร์การกระเจิงของอะตอม (atomic scattering factor) อีกด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์โครงสร้างกับค่าต่างๆ ดังกล่าวจึงเขียนได้ดังนี้

$$F = \sum_n^N f_n e^{2\pi i(ax_n + by_n + cz_n)} \quad (5.6)$$

ในที่นี้

$f_n$  คือแฟกเตอร์การกระเจิงของอะตอมตัวที่  $n$   
 $(x_n, y_n$  และ  $z_n)$  คือตำแหน่งของอะตอมตัวที่  $n$   
 $N$  คือ จำนวนอะตอมทั้งหมดในหน่วยเซลล์

## บทที่ 6

### สมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

จากทฤษฎีแถบพลังงานของอิเล็กตรอน เราสามารถใช้โครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนเพื่อแบ่งชนิดของสารในเชิงไฟฟ้าออกเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนได้ตามลำดับ สำหรับสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแถบพลังงานจะมีลักษณะพิเศษแตกต่างจากสารชนิดอื่น คือที่อุณหภูมิห้องจะมีอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยในแถบนำหรือมีโฮลเล็กน้อยในแถบวาเลนซ์ และมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.3 eV ซึ่งทำให้นำไฟฟ้าได้ไม่สะดวก นอกจากนี้ระดับพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งกำหนดโดยระดับเฟอร์มิ (Fermi level) นั้น สามารถปรับระดับได้โดยการเติมสิ่งเจือปนทำให้เกิดพาหะอิสระ (carriers) สามารถนำไฟฟ้าได้

#### 6.1 ความหนาแน่นของพาหะอิสระที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน[3]

การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนของพาหะอิสระซึ่งหมายถึงอิเล็กตรอนในแถบนำ และโฮลในแถบวาเลนซ์ ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน (Thermal energy) ให้ขึ้นไปยังแถบนำ และที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ซึ่งที่ว่างดังกล่าวก็คือโฮลนั่นเอง โอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานเป็นไปตามฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรค (Fermi-Dirac distribution) ดังนั้นถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้น โอกาสที่จะมีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำจะมากขึ้น

ถ้ากำหนดให้  $N_C(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะพลังงานในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E+dE$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ใด ๆ จะเท่ากับ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)d(E) \quad (6.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$f(E) = 1/\exp[(E-E_F)/kT]+1 \quad (6.2)$$

$E_F$  คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ

$k$  คือ ค่าคงที่โบลซ์มันน์

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n(E)dE = \int_{E_C}^{\infty} N_C(E)f(E)dE \quad (6.3)$$

เมื่อ  $E_C$  คือ สถานะของพลังงานที่ขอบล่างสุดของแถบนำ

$E_V$  คือ สถานะของพลังงานที่ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์

และ  $N_C(E)$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of states) ของแถบนำซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ

$$N_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (6.3)$$

เมื่อ  $m_e$  คือ มวลยั้งผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนในแถบนำ

ดังนั้นจะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_C}^{\infty} \frac{(E - E_C)^{1/2}}{E_C \exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (6.4)$$

ถ้า  $(E-E_F)/kT \gg 1$  แล้ว

$$n = N_C \exp\left(\frac{-E_C - E_F}{kT}\right) \quad (6.5)$$

เมื่อ

$$N_C = 2 \left( \frac{m_e kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

ในการทำงานเดียวกัน เราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = N_c \exp\left(\frac{-E_F - E_V}{kT}\right) \quad (6.6)$$

โดยที่

$$N_V = 2 \left( \frac{m_h kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

เมื่อ  $m_h$  คือมวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์ และจะได้

$$np = N_C N_V \exp(-E_g/kT) \quad (6.7)$$

เรียกสมการที่ (6.7) นี้ว่า กฎของกิริยาเชิงมวล (mass action law) ซึ่งหมายถึง ผลคูณของความหนาแน่นของพาหะอิสระทั้งสองชนิดมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง และจะไม่ขึ้นกับระดับพลังงานเฟอร์มิ ถ้าความหนาแน่นของพาหะชนิดใดเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของพาหะอีกชนิดหนึ่งต้องลดลง ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำที่เป็นจริง (real crystal) จะมีทั้งพาหะข้างมาก (majority carriers) และพาหะข้างน้อย (minority carriers)

### 6.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก (intrinsic semiconductor)[3]

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกสมบูรณ์ (perfect crystal) และไม่มีสิ่งเจือปนซึ่งจะให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ในแถบนำจะเท่ากับความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ นั่นคือ  $n=p$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.7) จะได้ว่า

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT) \quad (6.8)$$

และระดับพลังงานเฟอร์มิจะเป็นไปตามสมการ

$$E_{Fi} = (1/2)E_g + (3/4)kT \ln(m_p/m_e) \quad (6.9)$$

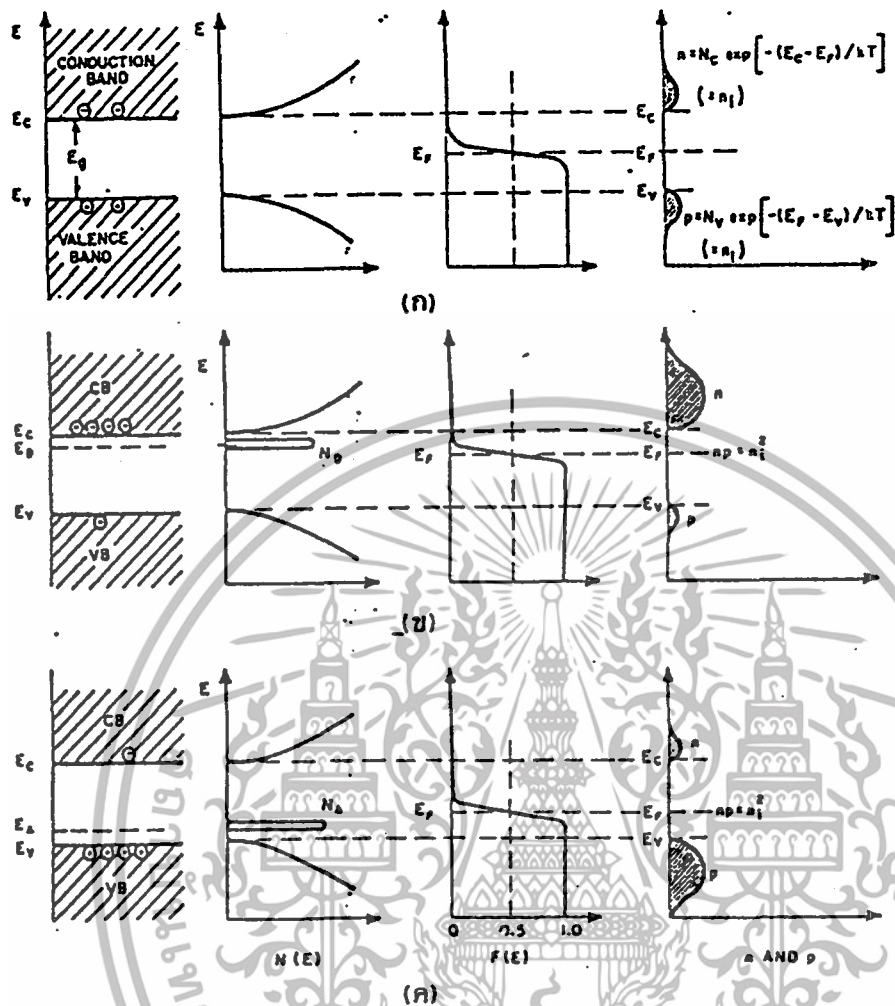
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกจะอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานและจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย

### 6.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก (Extrinsic semiconductor)[3]

เมื่อมีการเติมสิ่งเจือปนลงไปในผลึกสมบูรณ์ของสารกึ่งตัวนำ อะตอมเหล่านี้จะก่อให้เกิดระดับพลังงานของสิ่งเจือปน (impurity energy level) ขึ้นในช่องว่างแถบพลังงาน การเติมสิ่งเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำสองชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งเจือปน โดย ถ้าสิ่งเจือปนเป็นชนิดผู้รับ (acceptor) ผลึกที่มีสิ่งเจือปนชนิดนี้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) แต่หากสิ่งเจือปนที่เติมไปเป็นชนิดผู้ให้ (donor) เรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

ถ้าสิ่งเจือปนที่ปรากฏในสารกึ่งตัวนำมีทั้งผู้ให้และผู้รับ สารกึ่งตัวนำนั้นจะแสดงชนิดการนำไฟฟ้าแบบใดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะข้างมากกว่าเกิดจากสิ่งเจือปนชนิดใด เมื่อมีการเติมสิ่งเจือปนลงไประดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะปรับระดับเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ในทำนองเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก ตามสมการ (6.5) และ (6.6) ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 แสดงไดอะแกรมแถบพลังงาน ความหนาแน่นสถานะ การกระจายของฟังก์ชันเฟอร์มี-ดิแรก และความหนาแน่นพาหะอิสระ ตามลำดับ[3]

- ก) สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก
- ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค) สารกึ่งตัวนำชนิดพี

### 6.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮล[3]

เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านี้เกิดการเคลื่อนที่กลายเป็นกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density,  $J$ ) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field,  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

$$\sigma = J/E \tag{6.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$J = nev \quad (6.11)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนของอิเล็กตรอน

$e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$v$  คือ ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ของอิเล็กตรอน

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq\mu_n \quad ; \text{ อิเล็กตรอน} \quad (6.12)$$

$$\sigma = nq\mu_p \quad ; \text{ โฮล} \quad (6.13)$$

เมื่อ  $\mu_n = v/E$  เรียกว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ ของอิเล็กตรอน

และ  $\mu_p$  คือสภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮล

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลคือ

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (6.14)$$

ในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิก สภาพนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$\sigma = N_c q (\mu_n + \mu_p) \exp(-E_g/2kT) \quad (6.15)$$

จะเห็นว่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกจะเพิ่มตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ต่างไปจนสารชนิดอื่น ๆ ถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \sigma$  กับ  $1/T$  จะได้เส้นตรงที่มีค่าความชัน (slope) เท่ากับ ดังนั้นจะสามารถทราบค่า ช่องว่างแถบพลังงานได้

### 6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [20]

วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้สามารถกระทำได้หลายวิธีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์เข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงนี้เป็นวิธีที่จะกล่าวถึงนี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสโดยผ่านกระแสเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น ซึ่งวิธีต่าง ๆ เหล่านี้เป็นวิธีที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้กันอยู่ทั่วไปทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดและรูปร่างของสารตัวอย่างซึ่งสามารถจำแนกวิธีการต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

### 6.3.1 วิธีวัดโดยตรง (Direct method)[20]

ใช้วัดกับสารตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ทราบขนาดแน่นอน โดยวัดค่าความต้านทาน (R) แล้วจึงคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) ได้จาก

$$\rho = RA/L \quad (6.16)$$

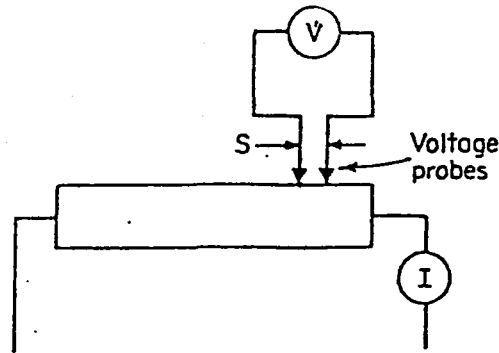
โดยที่ L คือความยาวของสารตัวอย่าง

A คือพื้นที่หน้าตัดของสารตัวอย่าง

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้นี้จะรวมเอาค่าความต้านทานของรอยต่อ (contact resistance) ระหว่างสารกึ่งตัวนำกับขั้วสัมผัสที่ใช้ด้วย ซึ่งเราสามารถลดผลของความต้านทานที่รอยต่อได้โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จะพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าย่อย ๆ ลดลงในขณะที่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนในที่สุดจะคงที่ นี่คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แท้จริง

### 6.3.2 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two points probe method)[20]

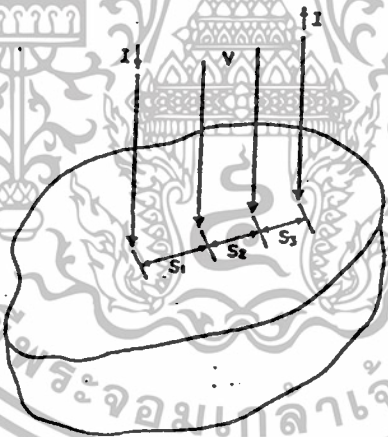
วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสของโวลท์มิเตอร์ไปบนแท่งสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อโลหะ (ที่ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร วิธีนี้จะขจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อได้ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะเป็นเหตุให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนไป และโวลท์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) ดังปรากฏในรูปที่ 6.2



รูป 6.2 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้ว[20]

### 6.3.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear Four-Point Probe method)[3]

วิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายให้กับชิ้นสารตัวอย่างที่นำมาวัด ยกเว้นในกรณีที่ออกแรงกดขั้วสัมผัสมากเกินไป การวัดจะใช้ขั้วสัมผัสสี่ขั้ววางเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วสัมผัสคู่แรก ส่วนขั้วสัมผัสคู่ในทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงตำแหน่งของขั้วสัมผัสตามวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรง[3]

ถ้าคิดว่าสารตัวอย่างเป็นแบบ เชมิ-อฟินิต จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$\rho = \frac{2\pi(V/I)}{[1/S_1 + 1/S_2 - 1/(S_1 + S_2) - 1/(S_2 + S_3)]} \quad (6.17)$$

เมื่อ  $V$  คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว  $S_2$  และ  $S_3$  นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว  $S_1$  และ  $S_3$

ถ้าระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสที่ค่าเท่ากัน ( $S_1=S_2=S_3$ ) สมการที่ (6.17) จะกลายเป็น

$$\rho = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (6.18)$$

นอกจากนี้ยังใช้ตัวสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมได้  
แล้วยังใช้กับสารตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตันหรือครึ่งทรงกระบอกได้

#### 6.3.4 วิธีวัดด้วยขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน(Non-collinear Probe Spacing method)[3]

วิธีนี้จะต่างกับวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วตั้งแต่ต้นตรงที่การจัดวางตำแหน่งของขั้วสัมผัสไม่  
อยู่ในแนวเดียวกันแต่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ ตามลักษณะชิ้นสารตัวอย่าง

##### 6.3.4.1 รูปสี่เหลี่ยมจตุรัส (Square Array)[3]

วิธีนี้มีการค้นคว้าหาแฟลคเตอร์ค่าแก้ที่เหมาะสมมากมาย เพื่อใช้กับสาร  
ตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางรูปร่างต่าง ๆ ถึงแม้ว่าจะไม่แพร่หลายเท่ากับวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่  
ขั้วในแนวเส้นตรงก็ตามที แต่ค่าที่วัดได้ก็ยังคงเป็นที่ยอมรับได้ สมการพื้นฐานที่ใช้ในการ  
คำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าคือ

$$\rho = \frac{2\pi S V}{2 - \sqrt{2} I} \quad (6.19)$$

##### 6.3.4.2 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Delta Four Point Probe)[3]

เป็นวิธีหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นบาง ๆ (thin layer) ซึ่งมีค่า  
สภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าฐานรอง ช่วงของสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความ  
หนาของชั้นบาง ๆ นั้นและระยะห่าง ระหว่างขั้วสัมผัส รวมทั้งความหนาและค่าสภาพ  
ต้านทานไฟฟ้าของฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.3.4.3 ขั้วสัมผัสอยู่ด้านบน-ด้านล่าง (Over-Under method)[3]

การวางตำแหน่งของขั้วสัมผัสระหว่างคู่ที่ให้กระแสไฟฟ้ากับคู่ที่วัดความต่างศักย์จะอยู่คนละด้านของสารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นบาง ๆ สมการที่ใช้ในการคำนวณก่อนข้างจับซ้อนตัวอย่างของช่วงที่วัดได้คือถ้าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสจะต้องน้อยกว่า 50 ไมครอน ถ้าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสก็สามารถที่จะเพิ่มขึ้นได้

#### 6.3.4.4 วิธีแวนเดอร์เพาว์ (Van der Pauw method)[3]

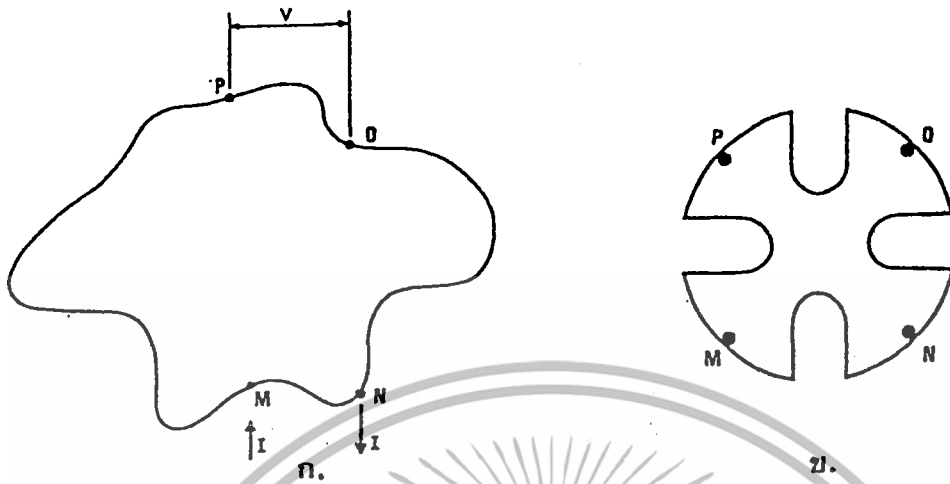
วิธีนี้จะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง รูปร่างไม่แน่นอนแต่หน้าสม่ำเสมอ โดยวางขั้วสัมผัสให้อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตัวอย่างดังกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

#### 6.3.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ [21]

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์นั้นจะให้ค่าถูกต้องโดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. จุดสัมผัสจะต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ
3. สารตัวอย่างจะต้องหนาเท่ากันตลอด
4. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องสม่ำเสมอไม่มีรูหรือรอยแยก

การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่างจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ก. แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่าง[3]

ข. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปเมื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด[3]

จากรูปที่ 6.5 ถ้าให้กระแสไฟฟ้า  $I_{MN}$  ผ่านเข้าทางจุด M ออกทางจุด N เราสามารถที่จะวัดความต่างศักย์

$V_{po} = V_p - V_o$  ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$R_{MN,OP} = \frac{V_p - V_o}{I_{MN}} \quad (6.20)$$

ถ้าเปลี่ยนให้กระแสไฟฟ้าเข้าทางจุด N และออกจากจุด O ก็จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการ (6.20) คือ

$$R_{NO,PM} = \frac{V_M - V_P}{I_{NO}} \quad (6.21)$$

ทั้งสมการที่ (6.20) และ (6.21) จะปรากฏในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{MN,OP}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\ln 2} R_{NO,PM}\right) = \quad (6.22)$$

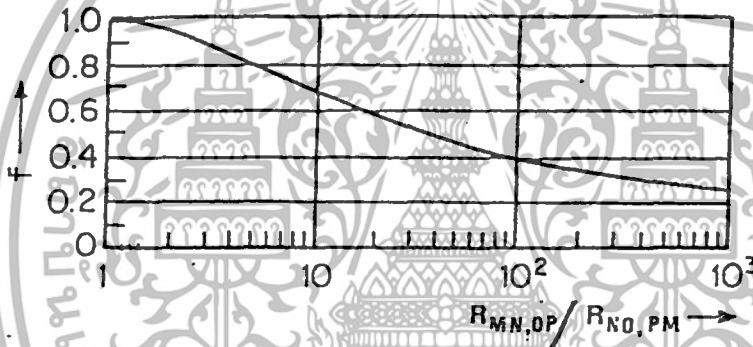
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของชั้นสาร

สมการที่ (6.22) สามารถเปลี่ยนเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเป็น

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left( \frac{R_{MN,OP} + R_{NO,PM}}{2} \right) f \left( \frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}} \right) \quad (6.23)$$

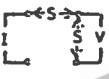



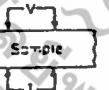
โดยที่  $f_n$  เป็นฟังก์ชันของ  $(R_{MN,OP}/R_{NO,PM})$  เรียกว่าแฟกเตอร์ค่าแก้ (correcting factor) ดังปรากฏอยู่ในรูป 6.5 ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะหาได้ง่ายจากสมการ (6.23)



รูปที่ 6.5 แสดงแฟกเตอร์ค่าแก้ของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ [21]

จากวิธีวัดทั้งหมดนี้แฟกเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่จะเป็นเหตุให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง คือรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าและออกจากสารกึ่งตัวนำซึ่งจะต้องเป็นรอยต่อที่ไม่ขัดขวางการไหลของกระแส (non-blackening contact) เพื่อให้ได้รอยตอดังกล่าวนี้จะต้องเตรียมผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมรวมทั้งชนิดและรูปร่างของขั้วสัมผัสจะต้องทำขึ้นจากวัสดุที่แข็งแรงปลายแหลมสามารถที่จะเจาะเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวหน้าของชั้นสารกึ่งตัวนำนั้น

ตารางที่ 6.1 แสดงรายละเอียดในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วสัมผัสที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน[3]

Description	Geometry	Resistivity given by	Advantages
Square array		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - \sqrt{2}} \frac{V}{I}$ $= 10.7 S \frac{V}{I}$	Given probe spacing will fit in smaller area
Square array		$R_s = \frac{2\pi}{\ln 2} \frac{V}{I}$ $= 9.06 \frac{V}{I}$	Given probe spacing will fit in smaller area
Rectangular		$\rho = \frac{2\pi S}{2 - (2/\sqrt{1+n^2})} \frac{V}{I}$	
Random placement at periphery of uniform-thickness plate		See van der Pauw	Irregularly shaped samples can be measured without precalculated correction factors
Delta		See Delta	Can be used to measure thin high-resistivity layers on low-resistivity layers
Over-under		See Over-under	Can be used to measure thin high-resistivity layers on low-resistivity layers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

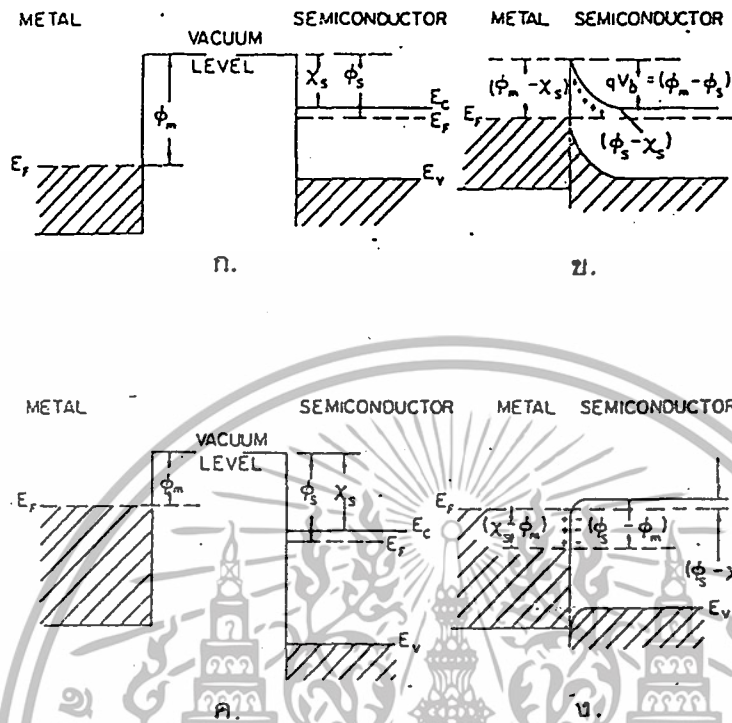
## บทที่ 7

### รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ปรากฏการณ์การไหลทางเดียว (rectify) ของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เริ่มมีการศึกษาดังแต่ปี พ.ศ. 2417 โดยเฉพาะตัวกรองกระแสชนิดรอยต่อเป็นจุด (point-contact rectifier) เป็นไดโอดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสมัยก่อนซึ่งในขณะนั้นทฤษฎีการนำไฟฟ้ายังไม่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย ต่อมาในปี พ.ศ. 2481 Schottky ได้เสนอแนวความคิดว่าการไหลทางเดียวของกระแสเกิดจากกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ถึงแม้ว่าแบบจำลองนี้จะเป็นในเชิงอุดมคติแต่ทว่าก็เป็นจุดเริ่มต้นที่นำไปสู่ความเข้าใจในพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและมีการพัฒนาทั้งทางทฤษฎีตลอดจนถึงอุปกรณ์ที่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง

#### 7.1 แบบจำลองของชอตต์กี (Schottky model) [22]

กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้น ณ รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมาจากความแตกต่างระหว่างค่าเวิร์คฟังก์ชัน (work function,  $\phi_m$ ) ของโลหะกับค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity,  $\chi_s$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ค่าเวิร์คฟังก์ชันของโลหะคือพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานเฟอร์มีของโลหะไปยังระดับสุญญากาศ (vacuum level) ส่วนค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีคือพลังงานที่ใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากขอบล่าง (bottom edge) ของแถบนำไปยังระดับสุญญากาศ กำแพงศักย์ที่ปรากฏการณ์ รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ  $(\phi_m - \chi_s)$  ดังรูปที่ 7.1

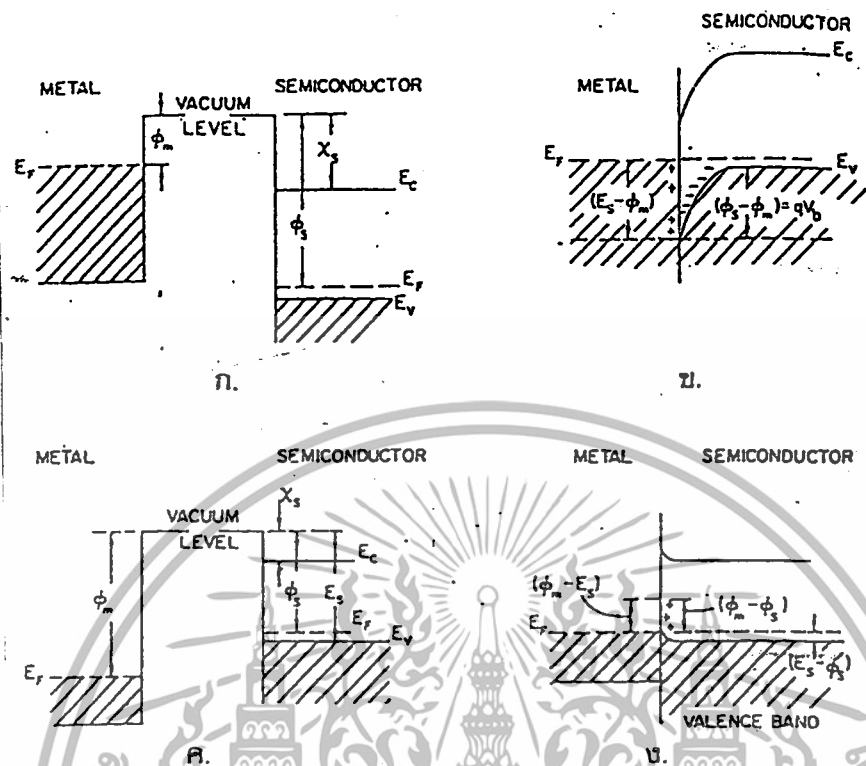


รูป 7.1 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น[3]

รูป ก. และ ข. มีค่า  $\phi_m > \chi_s$  ส่วนรูป ค. และ ง. มีค่า  $\phi_m < \chi_s$   
 รอยต่อในรูป ข. เป็นชนิดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว  
 รอยต่อในรูป ง. เป็นชนิดโอห์มมิก

อย่างไรก็ตามค่าของค่าแกงศักย์ที่ได้จากการทดลองไม่ใคร่จะสอดคล้องกับแบบจำลองของชอตต์กี ทั้งนี้เนื่องมาจากแบบจำลองนี้ใช้ค่าเวิร์คฟังก์ชันของโลหะซึ่งไม่ได้มีค่าที่แน่นอน แต่มีค่าเป็นช่วง ๆ ทั้งยังไม่สามารถจะทำนายสภาพการเป็นรอยต่อชนิดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียวหรือชนิดโอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำคู่หนึ่ง ๆ ได้ นอกจากนี้ในความเป็นจริงจะเกิดขึ้นบาง ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี (chemical layer) ที่รอยต่อด้วยอันได้แก่ ชั้นของออกไซด์ไนไตรด์หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำที่รอยต่ออันเนื่องมาจากมีอะตอมของโลหะแพร่เข้าไป ตลอดจนถึงสถานะผิว (surface state) ของสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นเองเนื่องจากการสิ้นสุดลงของคาบสนามศักย์ (periodic potential) ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะมีผลทำให้ค่าแกงศักย์ที่เกิดขึ้นไม่สอดคล้องตามแบบจำลองของชอตต์กีดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี[3]

รูป ก. และ ข. มีค่า  $\phi_m < x_s$  ส่วน ค. และ ง. มีค่า  $\phi_m > x_s$

รอยต่อในรูป ข. เป็นชนิดให้กระแสไฟฟ้าไหลทางเดียว

รอยต่อในรูป ง. เป็นชนิดโอห์มมิก

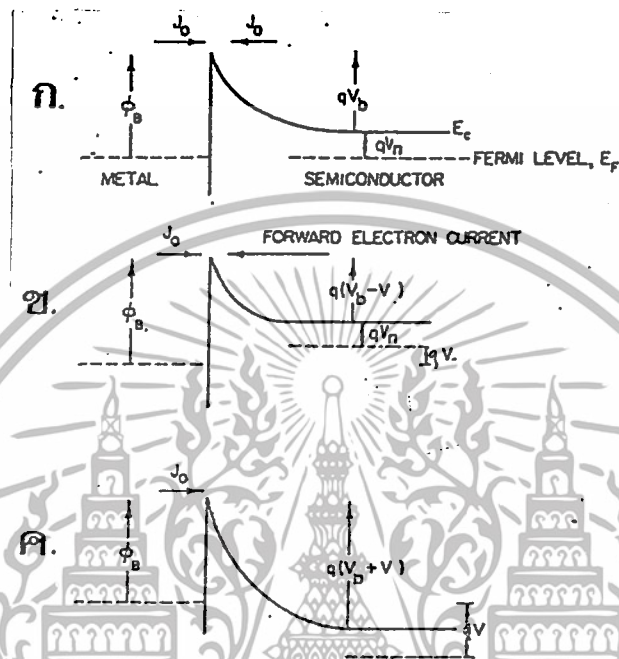
## 7.2 ทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (Thermionic Emission Theory) [22]

เป็นทฤษฎีที่อธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ตรงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำโดยมีสมมุติฐานดังนี้

1. กำแพงศักย์ ( $\phi_B$ ) จะต้องมีค่ามากกว่า  $kT$
2. ระบายที่ขนานกับรอยต่อจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งทำให้สามารถลดปัญหาในการไหลของกระแสเหลือเพียง 1 มิติ คืออยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบดังกล่าวนี้เท่านั้น
3. การที่มีกระแสสุทธิไหลจะไม่มีผลกระทบต่อสภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังกล่าวนั้นคือ เป็นการคิดกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำรวมกับกระแสที่ไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ โดยที่กระแสแต่ละค่านี้จะไหลผ่านกำแพงศักย์อย่างอิสระ โดยไม่ได้รับผลกระทบจากกระแสที่ไหลในทิศทางตรงกันข้าม



รูปที่ 7.3 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น[3]

- ก. ขณะไม่มีการไบอัส (zero bias) อยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน  
 ข. ขณะไบอัสตรง (forward bias)  
 ค. ขณะไบอัสกลับทาง (reverse bias)

ถ้ารอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีกำแพงศักย์เกิดขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อนี้ได้ต้องมีพลังงานสูงกว่าค่ากำแพงศักย์ ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ( $J_{S \rightarrow M}$ ) สามารถหาได้จากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_F + \phi_B$  และเคลื่อนที่ไปในแกน x ดังสมการ

$$J_{S \rightarrow M} = \int_{E_F + \phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (7.1)$$

เมื่อ  $v_x$  คือความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ของอิเล็กตรอนในแนวแกน x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$dn$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง  $E$  ถึง  $E + dE$  ซึ่งจะมีค่า ดังสมการ

$$dn = N_C(E)f(E)dE \quad (7.2)$$

เมื่อ  $N_C(E)$  คือความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of states)

$$N_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2}\right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (7.3)$$

$f(E)$  คือฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มี-ดิแรค

$$f(E) = \frac{1}{[\exp(E - E_F)/kT] + 1} \quad (7.4)$$

ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ( $E - E_F \gg kT$ ) ซึ่งทำให้  $\exp(E - E_F)/kT \gg 1$  จะประมาณค่าฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มี-ดิแรคด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแมกเวลล์-โบลซ์มานน์ (Maxwell-Boltzmann distribution function) ดังสมการ

$$f(E) = \exp[-(E - E_F)/kT] \quad (7.5)$$

แทนสมการที่ (7.3) และ (7.5) ลงใน (7.2) จะได้

$$dn = \frac{4\pi(2m_e)^{3/2}}{h^3} (E - E_C)^{1/2} \exp[-(E - E_C + qV_n)/kT] dE \quad (7.6)$$

โดยที่  $qV_n = E_C - E_F$

ถ้าสมมติว่าพลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนที่อยู่เหนือขอบล่างของแถบนำคือพลังงานจลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E - E_c = \frac{1}{2} m_e v^2$$

$$dE = m_e v dv \quad (7.7)$$

$$(E - E_c)^{1/2} = v(m_e / 2)^{1/2} \quad (7.8)$$

แทนสมการที่ (7.7) และ (7.8) ลงใน (7.6) จะได้

$$dn = 2 \left( \frac{m_e}{h} \right)^3 \exp(-qV_n / kT) \exp(-m_e v^2 / 2kT) 4\pi v^2 dv \quad (7.9)$$

จาก  $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (7.10)$

และ  $4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z \quad (7.11)$

แทนค่าสมการที่ (7.10) และ (7.11) ลงใน (7.9) แล้วจึงแทน (7.9) ลงใน (7.1) จะได้  
ว่า

$$J_{S \rightarrow M} = 2q \left( \frac{m_e}{h} \right)^3 \exp(-qV_n / kT) \int_{v_{ox}}^{\infty} v_x \exp(-m_e v_x^2 / 2kT) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-m_e v_y^2 / 2kT) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-m_e v_z^2 / 2kT) dv_z \quad (7.12)$$

$$J_{S \rightarrow M} = \left( \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} \right) T^2 \exp(-qV_n / kT) \exp(-m_e v_{ox}^2 / 2kT)$$

เมื่อ  $v_{ox}$  คือความเร็วต่ำสุดของอิเล็กตรอนในแนวแกน x ซึ่งอิเล็กตรอนสามารถข้ามกำแพงศักย์ไปได้ ซึ่งหาค่าได้จาก

$$\frac{1}{2} m_e v_{ox}^2 = q(V_b - V) \quad (7.13)$$

โดยที่  $V$  คือความต่างศักย์ที่ให้ (applied potential) ตกคร่อมรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและ  $V_b$  คือศักย์จลน์ (built-in potential) ของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{q}(\phi_m - \phi_s)$  หรือ  $\frac{1}{q}(\phi_B - V_n)$  แทนสมการที่ (7.13) ลงใน (7.12) จะได้

$$J_{S \rightarrow M} = \left( \frac{4\pi q m_e k^2}{h^3} \right) T^2 \exp[-q(V_n + V_b) / kT] \exp(qV / kT) \quad (7.14)$$

$$= A^* T^2 \exp(-\phi_B / kT) \exp(qV / kT)$$

โดยที่  $A^* = \frac{4\pi q m_e k^2}{h^3}$

สำหรับกรณีที่เกิดกระแสไหลจากโลหะมายังสารกึ่งตัวนำ กำแพงศักย์นี้จะไม่ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสคือ

$$J_{M \rightarrow S} = -A^* T^2 \exp(\phi_B / kT) \quad (7.15)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านรอยต่อคือ

$$J = J_{M \rightarrow S} + J_{S \rightarrow M}$$

$$= A^* T^2 \exp(-\phi_B / kT) [\exp(qV / kT) - 1] \quad (7.16)$$

โดยที่  $J_0 = A^* T^2 \exp(-\phi_B / kT)$  (7.17)

และเรียกค่า  $J_0$  นี้ว่าความหนาแน่นของกระแสริชาร์ดสัน (Richardson current density)

จาก  $I = AJ$

เมื่อ  $I$  คือกระแสไฟฟ้า

และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดที่มีกระแสไหลผ่าน

ถ้าให้ความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อซึ่งจะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad (7.18)$$

โดยที่  $I_0 = AA^* T^2 \exp(-\phi_B/kT)$  (7.19)

ซึ่งเรียกค่า  $I_0$  ว่ากระแสริชาร์ดสัน (Richardson current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่รอยต่อไม่มีการไบอัส (zero bias voltage) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อ ซึ่งอาจจะคิดได้ว่ามีกระแสจำนวนหนึ่งไหลจากโลหะผ่านรอยต่อเข้าสู่สารกึ่งตัวนำและในทำนองเดียวกันจะมีกระแสค่าเดียวกันนี้ไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะ ซึ่งจะทำให้กระแสลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นความหมายของกระแสรีชาร์ดสัน คือกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนในโลหะจำนวนหนึ่งที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_F + \phi_B$  สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์เข้าสู่สารกึ่งตัวนำได้อย่างอิสระ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสอันเกิดจากอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_F + q(V_b + V_{bi})$  และสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ได้อย่างอิสระเช่นเดียวกัน

### 7.3 ผลของชอตต์กี (Schottky effect)[3]

ผลของชอตต์กีเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้กำแพงศักย์ลดต่ำลง เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่เข้าไประหว่างรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยเริ่มพิจารณาจากกรณีที่โลหะอยู่ในสุญญากาศ พลังงานที่น้อยที่สุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะเข้าสู่ระดับสุญญากาศ (vacuum level) คือค่าเวิร์คฟังก์ชัน ( $\phi_m$ ) ขณะที่อิเล็กตรอนอยู่ห่างจากผิวโลหะเป็นระยะทาง  $x$  จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกที่ผิวโลหะ แรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุบวกที่ถูกเหนี่ยวนำนี้ (induced positive charge) จะเสมือนว่าเป็นแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับประจุบวกที่เกิดขึ้นที่ระยะ  $-x$  แรงดังกล่าวนี้จะมีค่าดังสมการ

$$F = -\frac{q^2}{4\pi(2x)^2\epsilon_0} = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \quad (7.20)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือสภาพยอม (permittivity) ของสุญญากาศ สำหรับงานที่เกิดจากการนำประจุลบจากระยะอนันต์มายังตำแหน่ง  $x$  จะมีค่าเท่ากับ

$$\int_{\infty}^x F dx = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (7.21)$$

ซึ่งก็คือค่าพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากผิวโลหะเป็นระยะทาง  $x$  เมื่อใส่สนามไฟฟ้า  $\mathcal{E}$  เข้าไป พลังงานศักย์ (P.E) ของอิเล็กตรอนจะกลายเป็น

$$P.E.(x) = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} + qx \mathcal{E} \quad \text{eV} \quad (7.22)$$

$$\text{ถ้า} \quad (d/dx)(P.E.(x)) = 0 \quad (7.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วค่ากำแพงศักย์ที่ลดลง ( $\Delta\phi_B$ ) ที่ระยะ  $x_m$  จากรอยต่อดังรูปที่ 7.4 มีค่าดังนี้

$$\Delta\phi_B = \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0}\right)^{1/2} = 2x_m \mathcal{C} \quad \text{V} \quad (7.24)$$

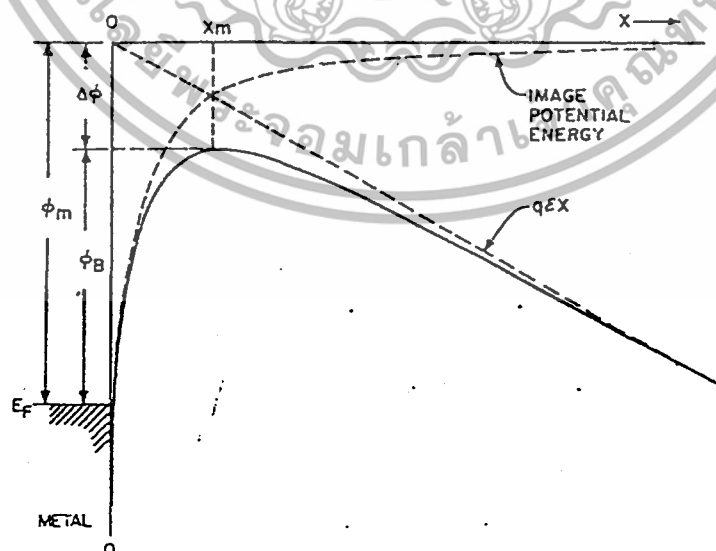
เมื่อ 
$$x_m = [q/(16\pi\epsilon_0 \mathcal{C}^2)]^{1/2} \quad \text{cm.} \quad (7.25)$$

ถ้าเป็นโลหะต่อกับสารกึ่งตัวนำ เราจะแทนค่า  $\epsilon_0$  ด้วย  $\epsilon_s$  ซึ่งเป็นค่าสภาพยอม (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงเท่ากับ  $(q/4\pi\epsilon_s)^{1/2}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป เพราะฉะนั้นค่าความหนาแน่นของกระแสริชาร์ดสัน (Richardson Current) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} J_0 &= A T^2 \exp[-(\phi_B - \Delta\phi_B)/kT] \\ J_0 &= A T^2 \exp[-(\phi_B/kT)] \exp[(q/4\pi\epsilon_s)^{1/2} / kT] \end{aligned} \quad (7.26)$$

เมื่อ 
$$\mathcal{C} = [2qN_D(V_b - V)/\epsilon_s]^{1/2}$$

นั่นคือ ค่าความหนาแน่นของกระแสริชาร์ดสันจะเพิ่มขึ้นจากเดิม (ดังสมการที่ (7.17)) เนื่องจากการลดลงของกำแพงศักย์ดังกล่าว



รูปที่ 7.4 แสดงการลดลงของกำแพงศักย์เนื่องมาจากสนามไฟฟ้า[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในการทำงานเดียวกันความหนาแน่นของกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำจะแสดงได้ดังสมการ

$$J_{M \rightarrow S} = -\frac{A^* T}{k} \exp(-\phi_B / kT) \int_0^{\infty} T(\xi) \exp(-\xi / kT) d\xi \quad (7.28)$$

$$= -\frac{A^* T}{k} \int_0^{q(V_b - \Delta\phi_B/q)} f_m T(\xi) (1 - f_s) dn$$

ความหนาแน่นของกระแสสุทธิจะได้จากการนำเอาสมการที่ (7.27) บวกกับสมการที่ (7.28) ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปที่งานขึ้นดังนี้คือ

$$J = J_s [\exp(qV/nkT) - 1] \quad (7.29)$$

เมื่อ  $V \gg kT/q$  สมการที่ (7.29) จะกลายเป็น

$$J \cong J_s \exp(qV/nkT) \quad (7.30)$$

เมื่อ  $J_s$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว (saturation current density)  
และ  $n$  คือ แฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor) ซึ่งนิยามขึ้นจาก

$$n = q / kT \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \quad (7.31)$$

สำหรับในทางปฏิบัติแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อมีการโด๊ปสิ่งเจือปนน้อย ๆ (low doping) และ/หรือที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการโด๊ปสิ่งเจือปนมาก ๆ และ/หรือที่อุณหภูมิต่ำ ๆ

ถ้าหากว่าความหนาแน่นของกระแสส่วนใหญ่เกิดจากขบวนการลอดผ่านกำแพงศักย์ ความหนาแน่นของกระแสดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูป

$$J_i = \exp(-\phi_B/E_{co}) \quad (7.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ 
$$E_{\infty} = \frac{\hbar}{2} [N_D / (\epsilon_s m_e)]^{1/2} \quad (7.33)$$

นั่นคือ ความหนาแน่นของกระแสจะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นของสิ่งเจือปนที่ถูกรับ  
( $N_D$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### รอยต่อแบบโอห์มมิก

ในการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสิ่งสำคัญคือต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อระหว่างโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำจะต้องมีความต้านทานน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานของชิ้นสารกึ่งตัวนำ (bulk resistance) เพื่อที่ว่าความต่างศักย์ที่ให้กับอุปกรณ์ (applied voltage) จะได้ไม่ตกคร่อม (voltage drop) ที่รอยต่อมากนัก ลักษณะที่บ่งบอกสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกคือค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ (specific contact resistance,  $R_C$ ) ซึ่งนิยามขึ้นดังสมการ[3]

$$R_C \equiv \left( \frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (8.1)$$

สำหรับรอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปน้อย (low doping) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจะมาจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ

$$R_C = \frac{k}{qA^*T} \exp(\phi_B / kT) \quad (8.2)$$

ฉะนั้นถ้าค่าแฟงศักย์ ( $\phi_B$ ) มีค่าน้อยจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อยด้วย

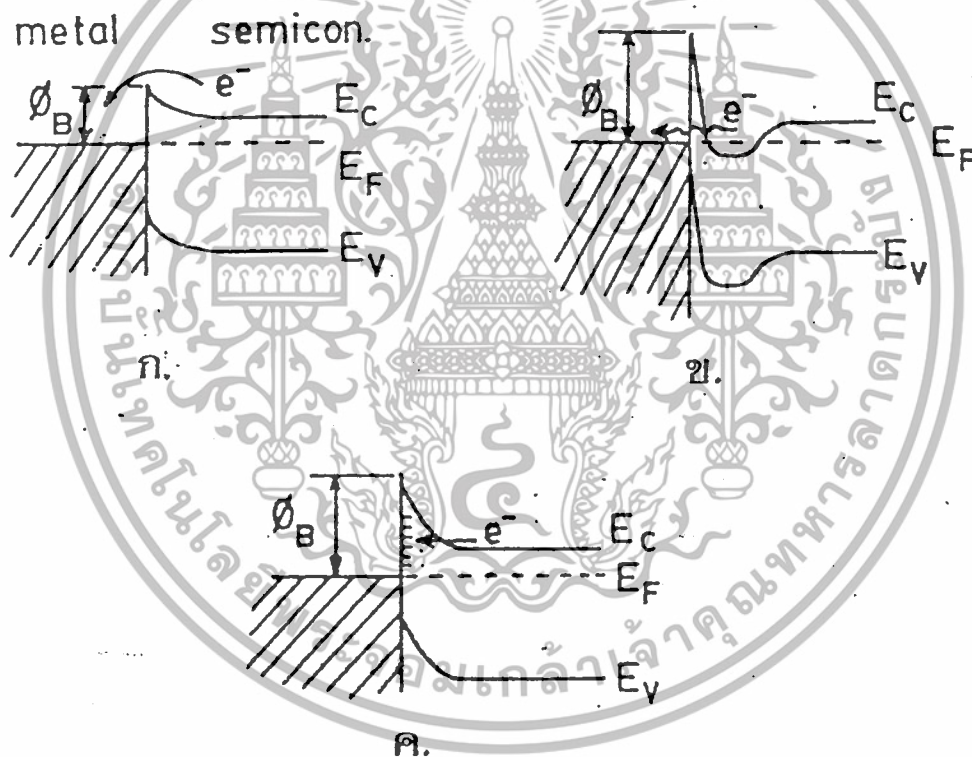
สำหรับรอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปมาก (high doping) ค่าแฟงศักย์จะแคบขึ้น ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากขบวนการลอดผ่านค่าแฟงศักย์ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ

$$R_C = \exp\left[2 \frac{(\epsilon_s m_e)^{1/2}}{h}\right] (\phi_B / \sqrt{N_D}) \quad (8.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะมีค่าน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปน ( $N_D$ ) เพิ่มขึ้น

ทั้งกรรมวิธีการได้ปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าแรงสัถย์ที่มีค่าต่ำอันจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อย ซึ่งจะเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี นอกจากนี้แล้วรอยต่อแบบโอห์มมิกยังทำได้จากการเตรียมรอยต่อที่มีความบกพร่องของผลึกเป็นจำนวนมากพอเหมาะ (suitably large density of defect sites) ซึ่งตำแหน่งความบกพร่องเหล่านี้จะเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้



รูป 8.1 แผนภาพแสดงกลไก (mechanism) การเกิดรอยต่อแบบโอห์มมิก[3]

- ก. รอยต่อที่ค่าแรงสัถย์มีค่าต่ำ
- ข. รอยต่อที่เกิดจากการได้ปมาก ๆ ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า
- ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในทางปฏิบัติการรู้แต่เพียงค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อเท่านั้นไม่สะดวกในการนำไปใช้งาน แต่ถ้าวัดทั้งความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height) และค่าความหนาแน่นของกระแสที่มากที่สุด โดยที่รอยต่อยังไม่แสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) ในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานจะเหมาะสมต่อการบอกลักษณะของรอยต่อแบบโอห์มมิกมากกว่าการใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ

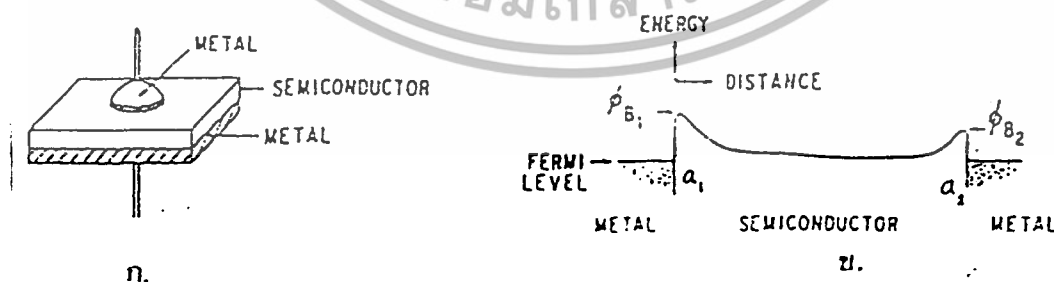
การที่จะเลือกใช้โลหะให้เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำของเราเพื่อให้ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าต่ำนั้นหาไม่่ง่ายนัก หรือการที่จะทำให้ได้ตำแหน่งข้อบกพร่องอันเหมาะสมที่รอยต่อนั้นเป็นการยากที่จะควบคุมได้ ทั้งยังไม่ทราบถึงกลไกที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง

ดังนั้นเราจะเลือกใช้วิธีการได้ปมากร ๆ ด้วยโลหะหรือโลหะชนิดที่เป็นอัลลอยด์ โดยคำนึงถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้ได้เป็น M-n<sup>+</sup>-n หรือ M-p<sup>+</sup>-p สมบัติของโลหะที่จะนำมาใช้ทำรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ต้องพิจารณาประกอบอีกด้วยคือ

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. ยึดติดกับอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ได้ดี
3. ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน
4. เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย

### 8.1 การหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ[23]

การศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำในที่นี้จะพิจารณาในระบบที่ประกอบด้วยคาโทด-บัลค์-แอโนด (cathode-bulk-anode) ดังรูป 8.2



รูปที่ 8.2 ก. ภาพแสดงสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น-โลหะซึ่งใช้ในการศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ[23]

ข. แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่สอดคล้องกับสิ่งประดิษฐ์ในรูป ก.[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้สามารถที่จะหาความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height) ได้ทั้งที่มีค่ามากหรือค่าน้อย โดยตั้งสมมุติฐานว่าปรากฏการณ์ที่เกิดกำแพงศักย์จะอยู่ที่รอยต่อระหว่างคาโทดกับบัลค์เท่านั้น ความต้านทานที่อยู่ถัดจากรอยต่อระหว่างคาโทดกับสารกึ่งตัวนำออกไป จะเรียกรวมกันว่าเป็นความต้านทานของบัลค์

ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนความหนาแน่นของกระแสที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ได้ ทั้งจากทางด้านโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำหรือจากด้านสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะจะเป็นไปตามสมการ

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-\phi_B/kT) \quad (8.4)$$

ถ้ารอยต่อมีพื้นที่  $a_1$  และความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ  $\phi_{B1}$  (ดังรูปที่ 8.2) ดังนั้นค่ากระแสริชาร์ดสัน (Richardson current) จะเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned} I_{01} &= a_1 J_0 \\ &= a_1 A^* T^2 \exp(-\phi_{B1}/kT) \end{aligned} \quad (8.5)$$

ในทำนองเดียวกันถ้ารอยต่อมีพื้นที่  $a_2$  ( $a_2 > a_1$  ดังรูปที่ 8.2 ก.) และความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ  $\phi_{B2}$  กระแสริชาร์ดสันจะมีค่าดังนี้

$$I_{02} = a_2 A^* T^2 \exp(-\phi_{B2}/kT) \quad (8.6)$$

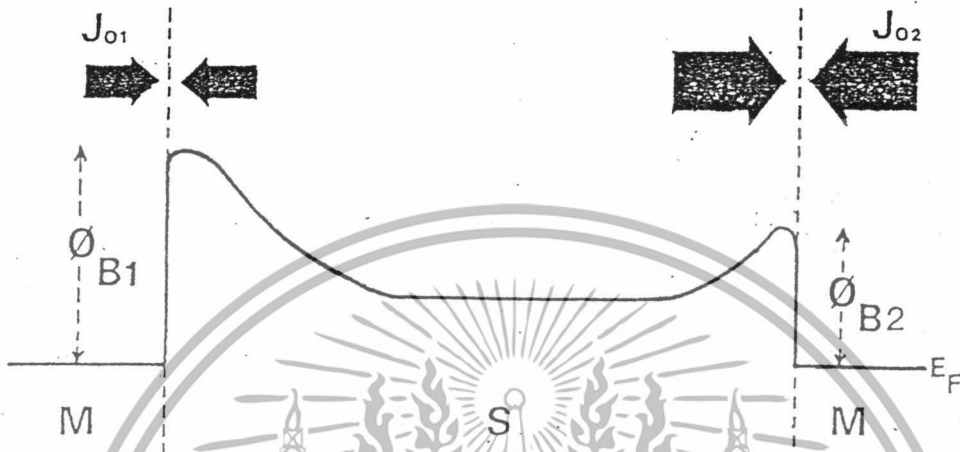
ในกรณีที่ใส่ความต่างศักย์ (applied voltage) ให้กับสิ่งประดิษฐ์ ดังรูปที่ 8.2 ก. กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของบัลค์ (bulk resistance,  $R$ ) จะเป็นไปตามสมการ

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (8.7)$$

เมื่อ  $V_R$  คือความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบัลค์ (voltage drop across the bulk)

ถ้าให้ขั้วลบ (negative side) ของความต่างศักย์  $V_1$  อยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_1$  กระแสที่ไหลผ่านกำแพงศักย์มีค่าเป็น  $I$  สำหรับในกรณีที่  $I \ll I_{01}$  แล้วกำแพงศักย์  $\phi_{B1}$

ของรอยต่อจะไม่มีผลในการขัดขวางการไหลของกระแส  $V_R$  ฉะนั้นความต่างศักย์ ของสมการที่ จะมีค่าเท่ากับ  $V_1$



รูปที่ 8.3 แสดงทิศทางและขนาดของกระแสริชาร์ดสันที่ไหลข้ามกำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  และ  $\phi_{B2}$  ตามลำดับในขณะที่ไม่มีการให้ความต่างศักย์แก่สิ่งประชิด [3]

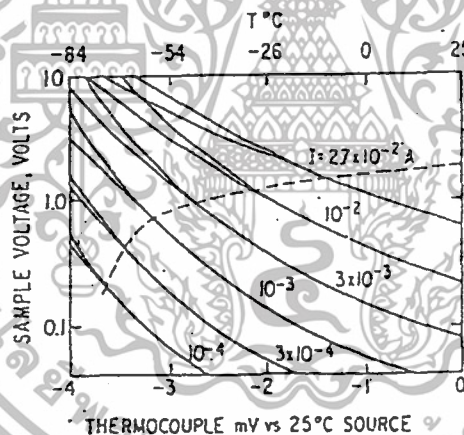
แต่ถ้าในกรณีที่ให้ขั้วลบของความต่างศักย์  $V_2$  อยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_2$  ถ้ากระแส  $I$  ค่าเดิม และ  $I \ll I_{o2}$  แล้วกำแพงศักย์  $\phi_{B2}$  จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแส เพราะฉะนั้น  $V_R$  จะเท่ากับ  $V_2$  หรือ  $V_1 = V_2$  นั่นคือเมื่อกระแสมีค่าน้อย ๆ ( $I \ll I_{o1}, I_{o2}$ ) ถึงแม้ว่าจะมีการสลับขั้วของความต่างศักย์ก็ตาม แต่กำแพงศักย์จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

แต่ในกรณีที่  $\phi_{B1} > \phi_{B2}$  หรือทราบแล้วว่า  $J_{o1} < J_{o2}$  ถ้ากำหนดให้พื้นที่  $a_1 \cong a_2$  เราจะได้  $I_{o1} < I_{o2}$  สำหรับในทางปฏิบัติถ้าให้กระแส  $I$  อยู่ในช่วง  $I_{o1} < I < I_{o2}$  ถ้าใส่ความต่างศักย์  $V_2$  เข้าไปโดยให้ขั้วลบอยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_2$  ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบัสต์ ( $V_R$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_2$  แต่ถ้าสลับขั้วของความต่างศักย์และต้องการจะให้ได้กระแส  $I$  ค่าเดิม จะเห็นได้ว่ากระแส ริชาร์ดสัน ( $I_{o1}$ ) มีค่าน้อยกว่ากระแส  $I$  ที่ต้องการ ฉะนั้นกระแส  $I$  นี้จะไดมาจากกระแสริชาร์ดสันรวมกับกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่ากำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  (คืออิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า  $E_F + \phi_{B1}$  ตามทฤษฎีเทอร์มิโอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความต่างศักย์ตกคร่อม (voltage drop) ขึ้นที่รอยต่อคั้งนั้นเพื่อให้ได้กระแส  $I$  ค่าคั้งกล่าว จะต้องมีการเพิ่มความต่างศักย์ (applied voltage) ขึ้นเป็น  $V_1$  โดยที่  $|V_1| > |V_2|$  สรุปได้ว่าถ้ากำหนดให้กระแส  $I$  มีค่าคั้งที่ (constant current) และ  $I_{01} < I_{02}$  แล้ว เราจะได้ว่า  $|V_1| > |V_2|$  แสดงว่าที่กระแสค่าคั้งนี้ค่าแกงศักย์  $\phi_{B1}$  เท่านั้นที่ขัดขวางการไหลของกระแส

สำหรับในการทดลองเพื่อที่จะหาค่าความสูงค่าแกงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะชนิดใด ๆ กับสารกึ่งตัวนำ ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันในการทำรอยต่อคั้งกล่าวค่าแกงศักย์  $\phi_{B1}$  จะเท่ากับ  $\phi_{B2}$  แต่กำหนดให้  $a_1 < a_2$  ซึ่งจะได้เงื่อนไข  $I_{01} < I_{02}$  เหมือนคั้งที่กล่าวมาข้างต้น จากเงื่อนไข  $I_{01} < I_{02}$ ,  $|V_1| > |V_2|$  และที่กระแสค่าคั้งที่หลาย ๆ ค่า รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (เนื่องมาจากอุณหภูมิมีผลต่อค่ากระแส  $I_{01}$  และ  $I_{02}$  ดังสมการที่ และ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์  $|V_1|$ ,  $|V_2|$  กับอุณหภูมิ  $T$  ของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) ดังปรากฏในรูปที่ 8.4



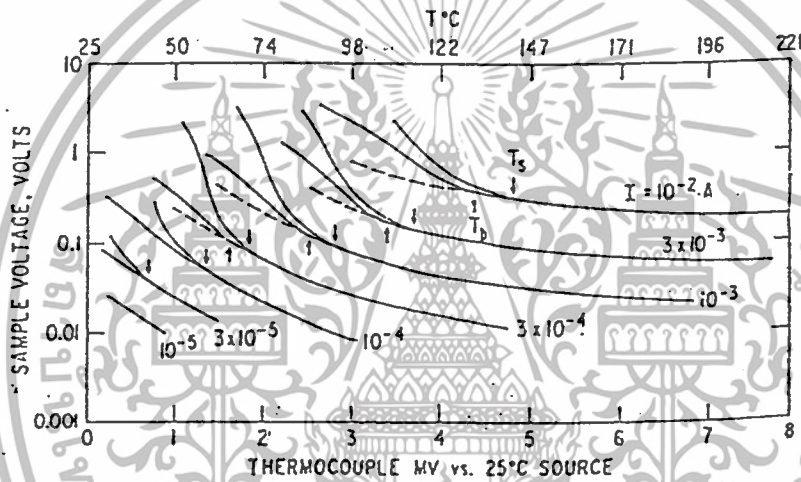
รูปที่ 8.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์คั้งรูปที่ 8.2 ซึ่งทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) กับอุณหภูมิที่กระแสคั้งที่ค่าต่าง ๆ [3]

จากกราฟในรูปที่ 8.4 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ  $-26^{\circ}\text{C}$  ค่าของความต่างศักย์  $|V_1|$  จะเท่ากับ  $|V_2|$  ที่กระแสค่าคั้งที่ทุกค่าเฉพาะค่าที่ต่ำกว่า  $10^{-2}$  A แต่ถ้ากระแสสูงกว่าคั้งนี้ความต่างศักย์  $|V_1|$  จะเริ่มมีค่ามากกว่า  $|V_2|$  แสดงว่าค่าแกงศักย์  $\phi_{B1}$  เริ่มมีผลในการขัดขวางการไหลของกระแส สำหรับกระแสค่าคั้งที่แต่ละค่าจะเกิดการแยก (split) ของ  $|V_1|$  และ  $|V_2|$  ที่อุณหภูมิ  $T_s$  คั้งนั้นค่าแกงศักย์จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแสเมื่อค่ากระแสและอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นประของรูปที่ 8.4 ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบัลลั V<sub>R</sub> จึงเท่ากับ |V<sub>1</sub>| และ |V<sub>2</sub>| นั่นคือเป็นการศึกษาความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิโดยที่ไม่มีผลของรอยต่อเข้ามาเกี่ยวข้อง

ถ้ายังคงมีการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า T<sub>s</sub> ต่อไปจนกระทั่งกระแสค่าคงที่ I > I<sub>02</sub> แล้ว |V<sub>2</sub>| > V<sub>R</sub> เส้นโค้งของกราฟระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิมิแนวโน้มที่จะโค้งแยกออกจากแนวเดิมที่อุณหภูมิ T<sub>b</sub> แสดงว่าค่าแรงศักย์ φ<sub>B2</sub> เริ่มมีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสค่าคงที่ I ดังปรากฏในรูปที่ 8.5

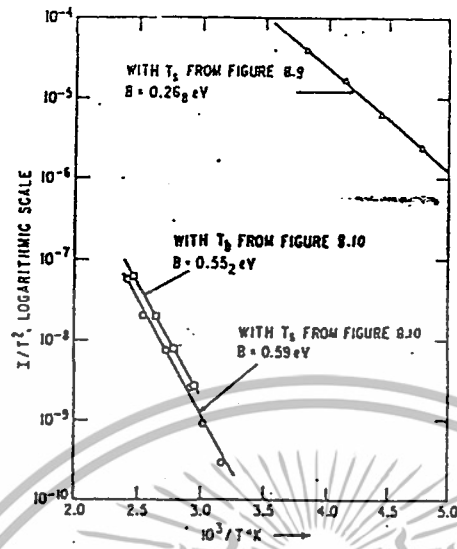


รูปที่ 8.5 แสดงอุณหภูมิ T<sub>s</sub> และ T<sub>b</sub> ที่กระแสค่าคงที่ต่าง ๆ [3]

นำเอาค่าของกระแสและอุณหภูมิที่จุดเริ่มมีการแยกของความต่างศักย์ (ดังรูปที่ 8.4 และ 8.5) ไปเขียนกราฟระหว่าง ln(I/T<sup>2</sup>) กับ 1/T โดยที่ T คือ T<sub>s</sub> หรือ T<sub>b</sub> จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ -φ<sub>B1</sub>/k หรือ -φ<sub>B2</sub>/k ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสได้โดยง่าย

ถ้าความสูงของกำแพงศักย์มีค่ามาก ที่อุณหภูมิห้องกำแพงศักย์ φ<sub>B1</sub> และ φ<sub>B2</sub> จะขัดขวางการไหลของกระแส ซึ่งทำให้ที่กระแสค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความต่างศักย์ |V<sub>1</sub>| จะไม่เท่ากับ |V<sub>2</sub>| ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิจนให้สูงขึ้นเพื่อหาค่าอุณหภูมิ T<sub>s</sub> แทนที่จะเป็นการลดอุณหภูมิจนให้ต่ำลงตามวิธีได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นที่กระแสค่าคงที่นี้ ความต่างศักย์ที่ได้จากการสลับขั้วจะมีค่าเท่ากัน (|V<sub>1</sub>| = |V<sub>2</sub>|) เมื่ออุณหภูมิมิสูงกว่า T<sub>s</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.6 แสดงการหาค่าความสูงของกัมพวงศักย์จากกระแสรีชาร์ดสันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ[3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

### วิธีและผลการทดลอง

ผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เตรียมวิธีโคเรกชันนัล ฟริชชิง โดยลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา กับแนวราบด้วยการลดอุณหภูมิเตาแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้วงจรไฟฟ้าต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาเพื่อทำการลดอุณหภูมิ โดยจะเตรียมสารตามสโตยคิโอเมตริ จากนั้นจะนำผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้นี้ไปตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชั่วคราวและความร้อนและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีของแวนเคอเพาว์ สุดท้ายจะทำการศึกษาสมบัติรอยต่อแบบโฮมมิกของ  $\text{CuInSe}_2$  กับ โลหะ In ที่เตรียมโดยวิธีระเหย In บน  $\text{CuInSe}_2$ ,  $\text{CuInSe}_2$  กับ In-Pb เตรียมวิธีนำ In-Pb กดลงบนผิวหน้าของ  $\text{CuInSe}_2$  แล้วทำการ anneal รอยต่อ และ  $\text{CuInSe}_2$  กับ In-Sn-Cd เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน จากนั้นต่อขั้วไฟฟ้าโดยใช้กาวนำไฟฟ้า (silver paint) เพื่อวัดความต้านทานระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ (I-V measurement) ที่อุณหภูมิ 77-300 องศาเคลวิน

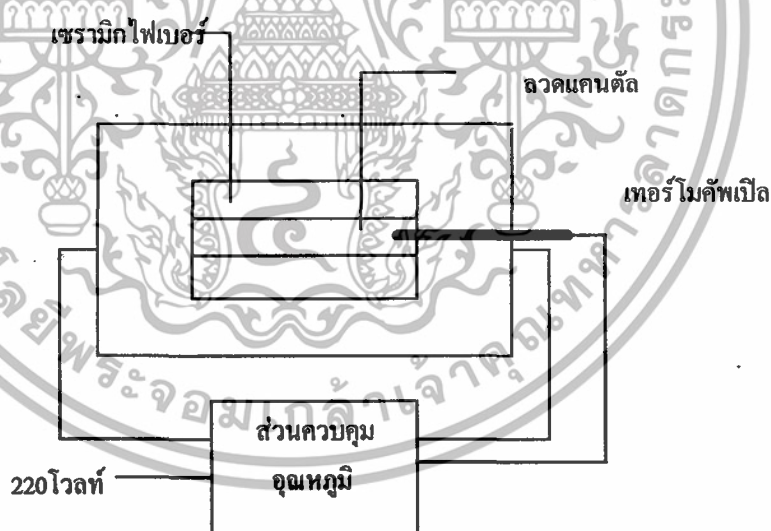
#### 9.1 การเตรียมผลึก

##### 9.1.1 การสร้างเตาไฟฟ้าโซนเดียวและส่วนประกอบของระบบเตา

เตาที่สร้างได้นี้เป็นเตาโซนเดียว (single zone furnace) ยาวประมาณ 54 เซนติเมตร โดยจะให้อุณหภูมิสูงสุด 600 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการแอนนิลสาร มีค่าเกรเดียนท์อุณหภูมิเตา (temperature gradient) ประมาณ 5 องศาเซลเซียสต่อเซนติเมตร ซึ่งสร้างโดยพันลวดแคนดัล (Kantal wire) รอบท่อพลาสติกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ก่อนที่จะพันลวดแคนดัล เราจะผ่าท่อออกตามแนวยาวแล้วตัดด้วยแผ่นไม้บางๆ แล้วนำแผ่นพลาสติกมาหุ้มรอบท่อ รัศมีให้แน่นด้วยเข็มขัดรัดท่อที่บริเวณปลายท่อทั้งสองข้าง จากนั้นใช้น้ำมันหล่อลื่นทาให้ทั่วแผ่นพลาสติกแล้วจึงนำลวดมาพัน โดยให้ระยะห่างของแต่ละรอบห่างกันอย่างสม่ำเสมอประมาณ 0.7 เซนติเมตร ในการพันลวดคั้นนั้นข้อควรระวังก็คือควรดึงลวดให้ตึงขณะที่ทำการพัน โดยยึดลวดด้านหนึ่งไว้ที่ปลายท่อแล้วพันลวดจนได้ความยาวประมาณ 54 เซนติเมตร จากนั้นยึดลวดไว้ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง แล้วจึงฉาบด้วยซีเมนต์ทนความร้อน 30 เอเอ็ม ให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ซึ่งซีเมนต์นี้จะทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันไม่ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการลัดวงจรอันเนื่องมาจากลวดแตะกันขณะที่ลวดร้อนและขยายตัวเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทั้งไว้ให้ปูนแห้งสนิท ในระหว่างที่รอให้ปูนแห้งเราต้องพรมน้ำวันละ 2 ครั้ง และตรวจดูว่ามีรอยแตกของซีเมนต์หรือไม่ ถ้ามีต้องทำการฉาบทับอีกครั้งหนึ่ง เมื่อปูนแห้งดีแล้วจึงเอาท่อพลาสติกที่เราใช้เป็นแกนออก โดยคลายเข็มขัดรัดท่อแล้วดึงแผ่นไม้ที่ใช้ขัดไว้ ออกก่อน จากนั้นจึงดึงท่อพลาสติกและแผ่นพลาสติกที่หุ้มท่อออก นำลงบรรจุในกล่องอลูมิเนียมขนาด 54×30×30 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) เป็นฉนวนความร้อนบรรจุในช่องว่างระหว่างท่อกับกล่องอลูมิเนียมอัดจนแน่น ส่วนหัวและท้ายเตาเราใช้ปูนที่ฉาบเป็นแผ่น โดยเอาลวดตาข่ายเป็นมาตรฐานแล้วทำช่องกลมตรงกลางเพื่อให้ท่อปูนได้พอดีที่ปลายท่อจะโผล่ออกมาได้ ทำรูเล็กๆ เพื่อสอดปลายลวดแกนดัดทั้งสองปลายที่ร้อยด้วยลูกบิดทนความร้อนออกมาจากข้างในเตาเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า และต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างเข้ากับระบบควบคุมอุณหภูมิเตา โดยมีแหล่งจ่ายไฟสลับ 220 โวลต์ ส่วนประกอบของระบบเตาโซนเคียวแสดงดังรูปที่ 9.1

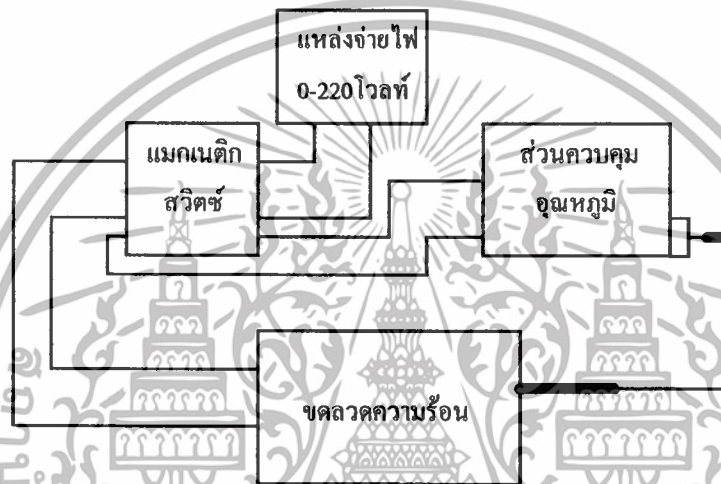


รูปที่ 9.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเตาโซนเคียวพร้อมทั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ

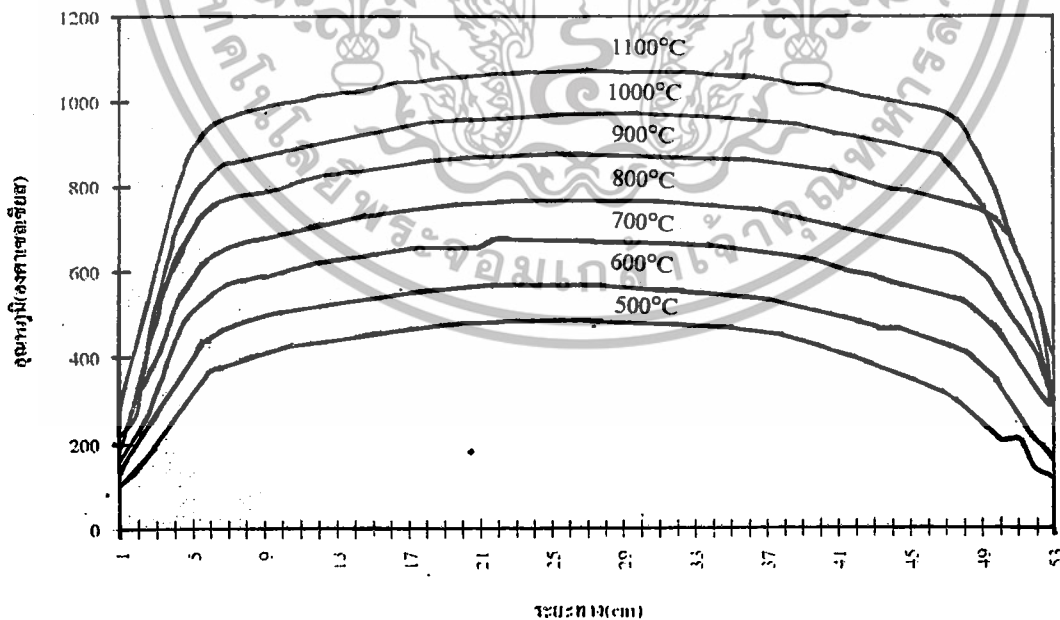
### 9.1.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิเตา

แหล่งจ่ายไฟ 220 โวลต์ ให้กับวงจรที่มีระบบควบคุมและตั้งอุณหภูมิโดยอาศัยแวนไดแอค (variac) เพื่อเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวดในเตาตามที่ต้องการ และใช้แมกเนติก สวิตช์ (magnetic switch) เป็นตัวตัดกระแสที่ป้อนให้กับเตาเมื่อพบว่าอุณหภูมิสูงกว่าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งไว้ เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ก็จะหยุดจ่ายกระแส และเมื่ออุณหภูมิภายในเตาลดลงจากค่าที่ตั้งไว้ ก็จะจ่ายกระแสให้กับเส้นลวดอีก โดยเราจะอ่านค่าอุณหภูมิของเตาผ่านทางเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิโดยการสอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปตามแนวยาวของท่อให้ปลายอยู่ที่ตำแหน่งกลางเตา โดยระบบควบคุมอุณหภูมิเตาและกราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาแสดงอยู่ในรูปที่ 9.2 และ 9.3 ตามลำดับ



รูปที่ 9.2 แสดงระบบควบคุมอุณหภูมิของเตา โชนเดี่ยว

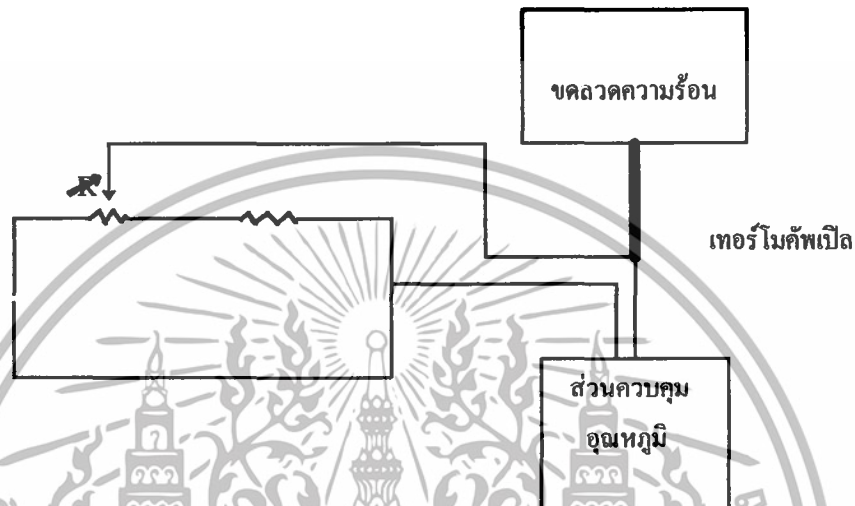


รูปที่ 9.3 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโดยที่อุณหภูมิกลางเตาเป็น

1100,1000,900,800,700,600,500 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่สำคัญของระบบควบคุมอุณหภูมิที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อลดอุณหภูมิให้แก่เตาโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 9.4

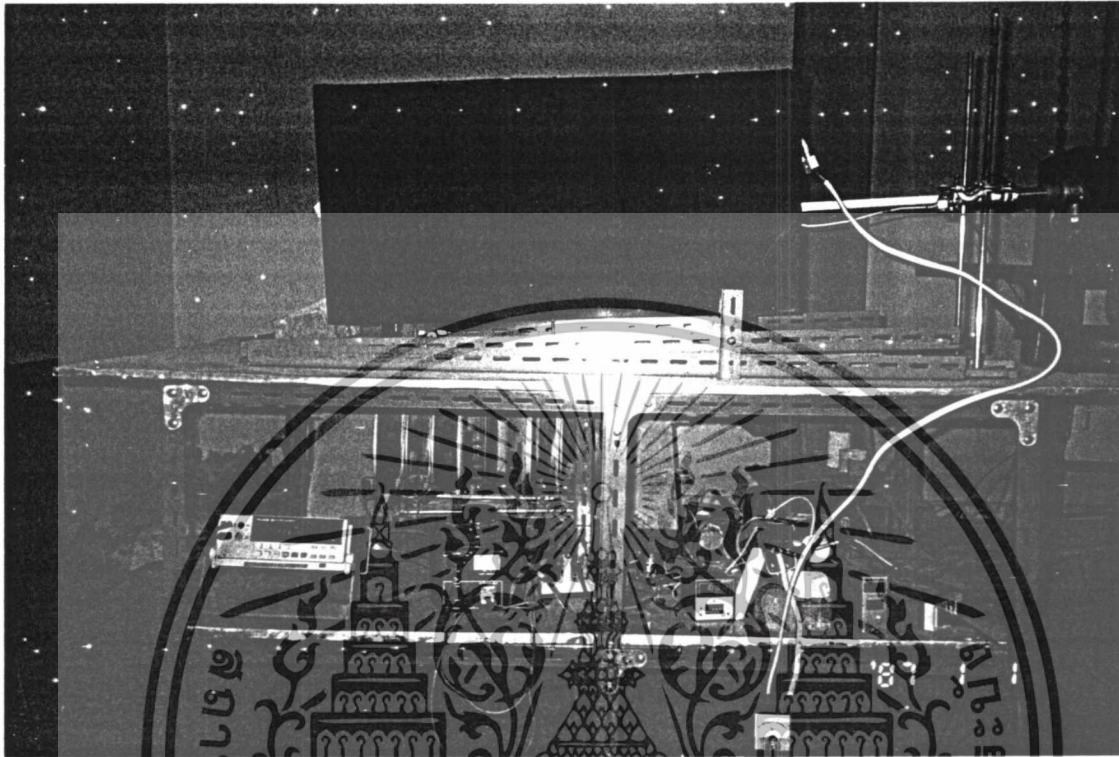


รูปที่ 9.4 แสดงวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิของเตา

เราจะใช้มอเตอร์รอบซ้ำกับเฟืองเป็นตัวเปลี่ยนค่าความต้านทาน  $R$  ซึ่งวงจรไฟฟ้านี้จะป้อนความต่างศักย์ให้กับเทอร์โมคัพเบิลอย่างช้าๆ ทำให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิปล่อยกระแสลดลงเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่อ่านได้จากความต่างศักย์ที่เทอร์โมคัพเบิล จะเป็นผลทำให้อุณหภูมิเตาลดลงประมาณ 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง

### 9.1.3 ส่วนประกอบของระบบเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา

เราใช้เตาหลอมโซนเดียวที่ขนาด  $54 \times 30 \times 30$  ลูกบาศก์เซนติเมตร วางบนแท่นที่สามารถปรับมุมให้เตาเฉียงประมาณ 5 องศาได้อย่างสะดวก ส่วนที่สำคัญคือวงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ที่ต่อพ่วงเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิเพื่อทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิโดยอัตโนมัติดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น



รูปที่ 9.5 แสดงระบบเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา ขณะกำลังหลอมสารที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

#### 9.1.4 การเตรียมหลอดแก้ววอท์ซ์เพื่อบรรจุสาร

ภาชนะที่ใช้ในการเตรียมสารนี้จะต้องทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 1150 องศาเซลเซียส ดังนั้นเราจึงเลือกใช้หลอดแก้ววอท์ซ์ที่ทนอุณหภูมิได้ถึง 1583 องศาเซลเซียสจึงเริ่มหลอมเหลว ใช้หลอดแก้ววอท์ซ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 20 เซนติเมตร ทำความสะอาดโดยใช้สารละลาย  $\text{HCl}:\text{HNO}_3$  ด้วยอัตราส่วน 3:1 และน้ำดีไอออไนซ์ 10 ส่วน แช่หลอดทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆครั้งแล้วเป่าให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปปิดปลายหลอดข้างหนึ่งให้เป็นรูปกรวยมีมุมกรวยประมาณ 30 องศา ด้วยเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซติลีน ที่ให้ความร้อนได้สูงกว่า 1300 องศาเซลเซียส แล้วทำคอคอดโดยให้ห่างจากปลายปิดประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการหลอมปิดหลอด (seal) และต้องพยายามทำให้น้ำวอท์ซ์บริเวณคอคอดมีความหนาพอสมควรเพื่อที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลีกเลี่ยงการรั่วไหลของหลอดในขณะที่กำลังหลอมปิดและยังเป็นการทำให้หลอดมีความแข็งแรงทนต่อบรรยากาศของแก๊สในขณะที่หลอมสารตัวอย่างด้วย

#### 9.1.4.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดหลอดแก้วควอทซ์

เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนที่อาจเกิดขึ้นในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เตรียม เนื่องจากความสกปรกของหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสาร ดังนั้นหลอดแก้วควรจะสะอาดมากที่สุด เพื่อที่สารกึ่งตัวนำที่ได้จะไม่ติดกับผนังของหลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะทำให้ขนะทูปหลอดให้แตก สารกึ่งตัวนำจะแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ยากต่อการที่จะนำไปตัดเป็นชั้นบางๆ ให้มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปศึกษาในขั้นต่อไปได้ เราจะเลือกใช้การทำความสะอาดด้วยสารละลายเคมี แต่ที่ควรระวังก็คือ สารละลายเคมีที่ใช้จะเป็นอันตรายเนื่องจากเป็นสารจำพวกกรด ดังนั้นผู้ใช้จะต้องสวมหน้ากากป้องกันไอพิษ สวมถุงมือป้องกันกรด และควรทำในสถานที่ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก ซึ่งก็คือตู้ควันสำหรับดูดไอพิษทิ้ง (fume hood) ขั้นตอนการทำความสะอาดหลอดแก้วมีดังต่อไปนี้

1. ล้างหลอดแก้วควอทซ์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้ง เพื่อขจัดฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกออกให้หมด
2. เติมสารละลายที่ประกอบด้วย  $\text{HCl}:\text{HNO}_3$  ด้วยอัตราส่วน 3:1 และน้ำดีไอออไนซ์ 10 ส่วนเข้าไปจนเต็มหลอดแช่ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที เขย่าหลอดสักครู่ รินสารออกให้หมด
3. ใส่สารละลายกรดเจือจางของ HF กับน้ำดีไอออไนซ์ จนเต็มหลอด แช่ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีรินออกเล็กน้อยเขย่าหลอดสักครู่ แล้วรินออกให้หมด
4. ล้างหลอดแก้วควอทซ์ที่เตรียมเสร็จด้วยน้ำดีไอออไนซ์อีกหลายๆครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีกรดหลงเหลืออยู่ภายในหลอด
5. เมื่อหลอดแก้วควอทซ์สะอาดดีแล้ว เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน หรืออาจนำไปอบให้แห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. หุ้มปากหลอดด้วยฟอยล์ (foil) หรือแผ่นพลาสติกสะอาด เพื่อป้องกันฝุ่นละออง ก่อนที่จะนำไปบรรจุธาตุ

### 9.1.4.2 การชั่งและบรรจุธาตุในหลอดแก้วควอทซ์

นำธาตุ Cu, In และ Se ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่คำนวณไว้ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าที่อ่านค่าละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่งในหน่วยกรัม เนื่องจาก Se มีจุดเดือดต่ำ จึงระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเราจะใช้ความร้อนสูงที่บริเวณคอคอดคในขณะหลอมปิดด้วยไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซติลีน ดังนั้นจึงควรให้เหลือที่ว่างระหว่างเหนือธาตุกับคอคอดประมาณ 2 เซนติเมตร เพื่อที่จะเพิ่มที่ว่างของธาตุในสภาวะหลอมเหลว ซึ่งจะทำให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีผิวหน้าอิสระ (free surface) เพิ่มขึ้นตามต้องการ

รายละเอียดและสมบัติของธาตุที่ใช้เพื่อเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จำนวน 15 กรัม ที่มีสัดส่วนตามสคอยคิโอมเมตรรี แสดงดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 แสดงน้ำหนักที่คำนวณได้และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหลอมสารกึ่งตัวนำจำนวน 15 กรัม ที่มีสัดส่วนตามสคอยคิโอมเมตรรี[3]

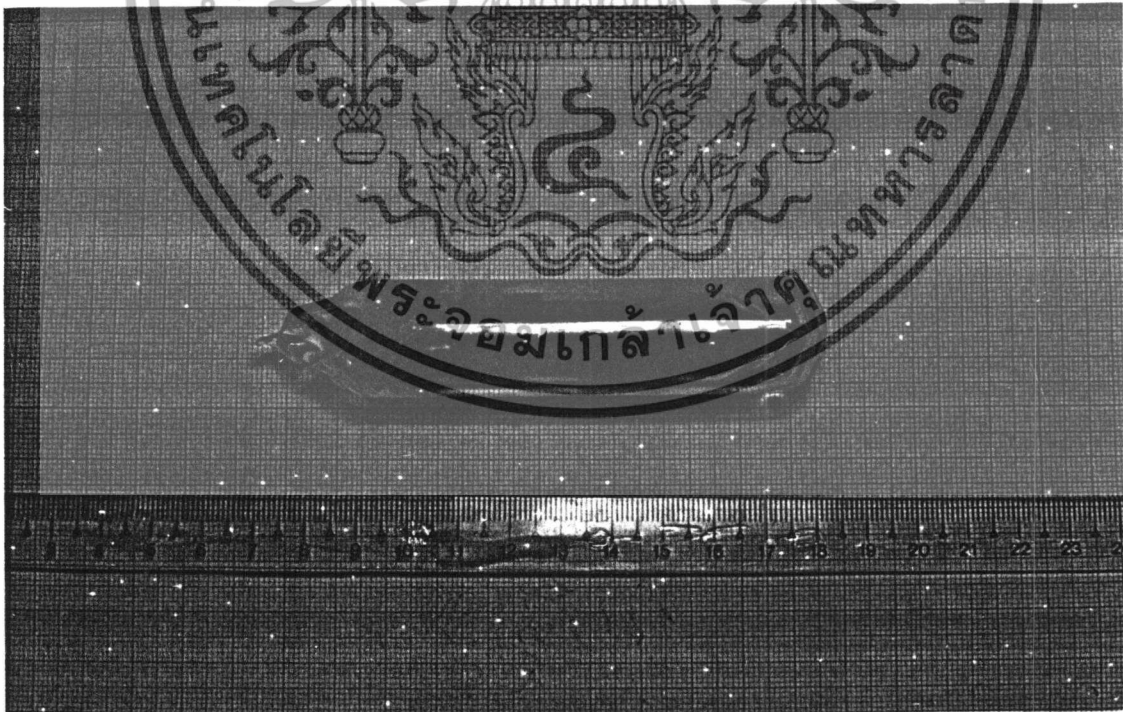
ธาตุ	ความบริสุทธิ์ (%)	น้ำหนักอะตอม (gm)	น้ำหนักธาตุ (gm)	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	ลักษณะของธาตุ
Cu	99.999	63.546	2.8345	1083	2567	เป็นก้อนโลหะแข็งเหนียวเป็นมันวาว
In	99.999	114.82	5.1215	156.4	2050	โลหะอ่อนเป็นก้อนสีบรอนซ์
Se	99.999	78.96	7.0440	217	688	เป็นก้อนเล็กๆสีน้ำตาลดำ

### 9.1.4.3 การหลอมปิดแก้วควอทซ์

ทาบบริเวณคานนอกของปากหลอดแก้วควอทซ์ ที่บรรจุธาตุเรียบร้อยแล้วด้วยกรีสที่ใช้กับระบบสุญญากาศ (vacuum grease) แล้วนำมาเสียบเข้ากับท่อของเครื่องโรตารี-ดิฟฟิวชันปั๊ม (rotary-diffusion pump) เพื่อทำการดูดอากาศภายในหลอดเนื่องจากเราไม่ต้องการให้ภายในหลอดมีอากาศเหลืออยู่เลยเพื่อป้องกันไม่ให้ธาตุทำปฏิกิริยากับอากาศภายในหลอดที่อุณหภูมิสูง ทั้งยังป้องกันการระเบิดของหลอดเนื่องจากความดันไอที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่สารกำลังหลอม เมื่อได้ค่าความดันที่ต้องการประมาณ  $10^{-6}$  ทอร์ปปล่อยทิ้งไว้ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ชั่วโมง เพื่อให้แก๊สที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิว (adsorbed) ของธาตุถูกดูดออกไปมากที่สุด แล้วจึงทำการหลอมปิดคอคอดโดยใช้ไฟจากเครื่องเชื่อมแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน โดยค่อยๆ ลนรอบๆ บริเวณคอคอดที่ทำไว้แล้วให้เนื้อแก้วควอทซ์ละลายอย่างช้าๆ จนกระทั่งหลอมติดเป็นเนื้อเดียวกันและพยายามทำให้เนื้อแก้วควอทซ์ตรงส่วนนี้หนาพอสมควรเพื่อป้องกันหลอดทะลุอันจะเกิดเนื่องจากความดันไอค่าสูงมากๆ ขณะหลอมสาร หลอดแก้วควอทซ์นี้อาจแตกร้าวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามาทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่เตรียมได้ในกรณีที่มีหลอดแตกหรือมีรอยร้าว เราจึงนำหลอดนี้มาบรรจุในหลอดแก้วควอทซ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่พอที่จะใส่หลอดแก้วที่บรรจุธาตุได้และล้างให้สะอาด หลังจากหลอมปิดปลายด้านหนึ่งและลนไฟเพื่อทำคอคอดตามวิธีเดียวกันกับหลอดเล็กแล้ว โดยหลอดชั้นในมีธาตุบรรจุอยู่ ดูดอากาศออกจนได้ความดันต่ำแล้วจึงหลอมปิดคอคอด ดังนั้นเราจะได้หลอดแก้วควอทซ์สองชั้น โดยหลอดชั้นในมีธาตุบรรจุอยู่ ชั้นที่กั้นหมายเลขกำกับไว้ก่อนที่จะนำไปหลอม ซึ่งเราจะหลอมสารทั้งหมดสองหลอดที่มีปริมาณธาตุเท่ากัน โดยในการหลอมปิดหลอดแก้วเพื่อใช้ในการเตรียมสารครั้งได้ทำการหลอมปิดที่ห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 9.6 แสดงหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุธาตุ Cu ,In ,Se ก่อนนำไปหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.1.5 ขั้นตอนและรายละเอียดในการเตรียมผลึก

### 9.1.5.1 ขั้นตอนในการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ ด้วยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศากับแนวราบ

นำหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุสารไว้เรียบร้อยแล้ววางเตาที่ตั้งเฉียงประมาณ 5 องศากับแนวราบอุบลปลายทั้งสองของท่อด้วยอิฐทนไฟเพื่อไม่ให้อากาศภายนอกซึ่งเย็นกว่าผ่านเข้าไปภายในเตาซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในไม่คงที่ตามที่ตั้งไว้ และป้องกันไม่ให้หลอดแก้วควอทซ์หลุดออกมานอกเตาในกรณีที่หลอดแก้วควอทซ์ระเบิดแตก จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิลเสียบเข้าไปยังตำแหน่งกลางเตาโดยให้แตะกับพื้นผิวท่อเตาเพื่อวัดค่าอุณหภูมิตรงตำแหน่งกลางเตา ซึ่งอุณหภูมิที่อ่านได้จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของหลอดสารมากที่สุด จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาอย่างช้าๆ โดยปรับวารีแอกให้ค่อยๆ จ่ายกระแสเพิ่มขึ้น เพิ่มอุณหภูมิเตาในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวสูงสุดของธาตุที่ใช้เตรียม ทั้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อปล่อยให้ธาตุต่างๆ หลอมเหลวในระยะเวลาหนึ่ง ในระหว่างนี้หมุนหลอดที่บรรจุธาตุด้วยแท่นเขรามิกเซียให้หลอกลงไปมา เพื่อให้ Cu, In และ Se ในหลอดแก้วควอทซ์หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้ดีขึ้น ทั้งยังช่วยไม่ให้เกิดช่องว่างเล็กๆ (voids) ขึ้นภายในเนื้อสารด้วย เพราะขณะที่หมุนหลอดแก้วควอทซ์นั้นธาตุต่างๆ ที่อยู่ภายในหลอดแก้วจะอยู่ในสภาวะหลอมเหลวและไหลคลั่งตามไปด้วย การหมุนจะหมุนหลอดแก้วไปในทิศทางเดิมมาพิก้าและตามเข็มนาฬิกาสลับกันไปมาเพื่อไม่ให้หลอดแก้วควอทซ์สองชั้นนั้นเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมเมื่อครบ 1 วันแล้วเราจะเริ่มลดอุณหภูมิเตาลงอย่างช้าๆ โดยใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์ โดยในช่วงแรกจะลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จากนั้นจะค่อยลดอุณหภูมิลงช้าๆ ด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เพื่อไม่ให้ผลึกนั้นเย็นตัวเร็วเกินไปและจะทำให้สารที่กำลังหลอมนี้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ สม่าเสมอจนเริ่มแข็งตัว จากปลายด้านหนึ่งสู่ปลายอีกด้านหนึ่ง ในช่วงอุณหภูมิ 950-850 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิในช่วง 850-750 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เพื่อเป็นการลดอัตราการเกิดรอยแตกเพราะที่ อุณหภูมिन้อยกว่า 810 องศาเซลเซียส จะเป็นจุดเปลี่ยนเฟสของสารประกอบ  $\text{CuInSe}_2$  ซึ่งดูได้จากเฟสไดอะแกรมของ  $\text{CuInSe}_2$  ส่วนในช่วง 750-300 องศาเซลเซียส จะลดอุณหภูมิเตาด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิจึง 300 องศาเซลเซียส แล้วสามารถหยุดจ่ายกระแสให้กับเตา

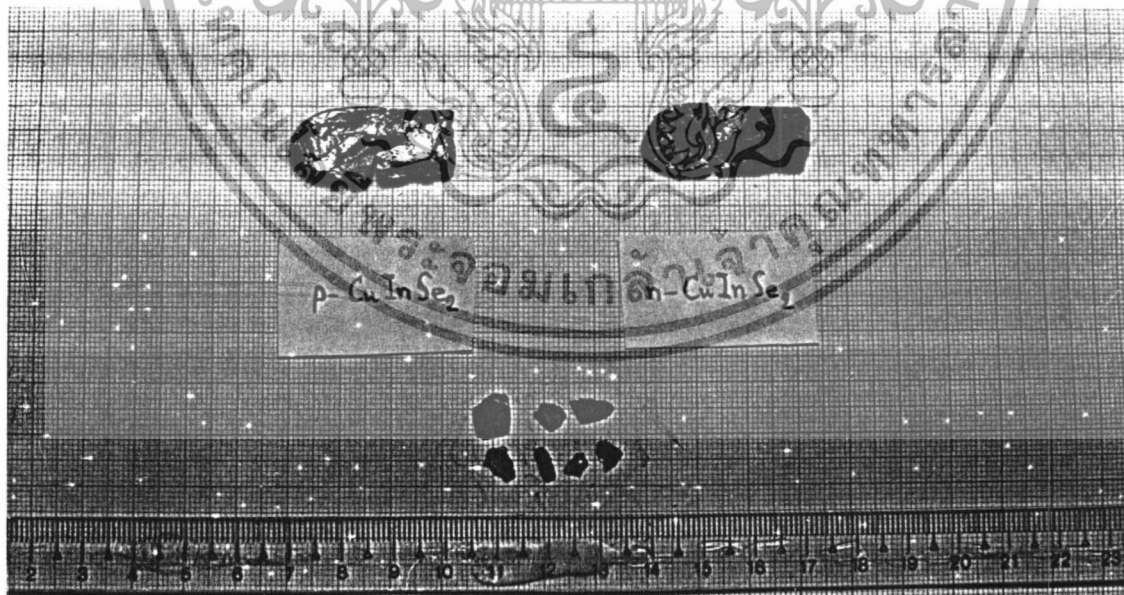
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยให้เตาเย็นตัวอย่างช้าๆ ทั้งไว้ประมาณ 1 วันจึงนำออกจากเตาตัดให้เป็นชิ้นเพื่อนำไปศึกษาต่อไป

### 9.1.5.2 ลักษณะของผลึกกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา

ในการเตรียมสารนี้ไม่พบปัญหาเรื่องหลอดแตกร้าวที่เกิดเนื่องจากความดันไภายในหลอดแก้วควอทซ์สูง สารตัวอย่างที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่ เป็นแท่งเกือบแบนราบ สีเทาดำ ที่ปลายหลอดรูปกรวยสารตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นรูปกรวยแหลมตามรูปร่างของหลอดสารตั้งรูป ผิวเนื้อสารด้านที่สัมผัสกับหลอดนี้ค่อนข้างเรียบเป็นมันสะท้อนแสงได้ แข็งแต่เปราะ บดเป็นผงได้ง่าย ขนาดของเกรนผลึกเดี่ยว (single grains) โตพอสมควรไม่ติดกับผิวหลอดแก้ว มีรอยแยกขนาดใหญ่ (bulk cracks) และขนาดเล็ก (microcracks) บ้างเล็กน้อย สามารถนำมาตัดใช้งานได้ เมื่อขัดผิวหน้าชิ้นสารที่ตัดมาใช้งานด้วยกระดาษทรายละเอียด จะสามารถมองเห็นขอบของเกรน (grain boundary) ได้

สารประกอบที่เตรียมได้ส่วนใหญ่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneities) ทั้งด้านองค์ประกอบ (composition) และชนิดการนำไฟฟ้า (conductivity type)



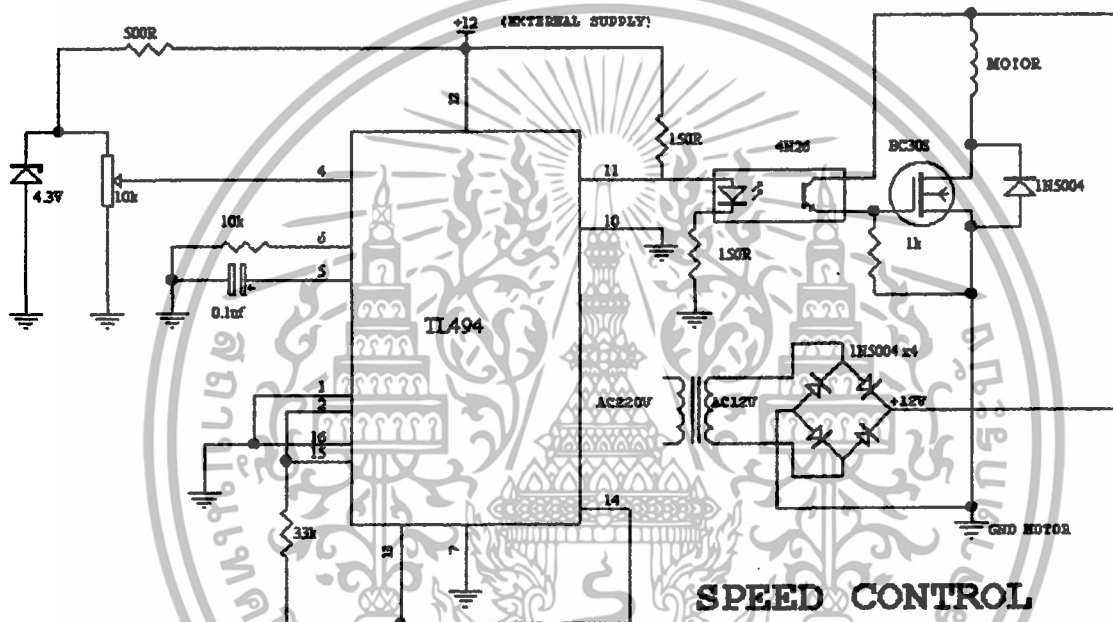
รูปที่ 9.7 แสดงขนาดของผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.2 การขัดขึ้นผลึก

### 9.2.1 การสร้างเครื่องขัด

เครื่องขัดขึ้นสารจะนี้ใช้เมื่อขัดสารด้วยผงอลูมินา โดยมีเป็นหมุนคลุมด้วยผ้าขัดชนิดเนื้อหยาบและผงขัดอลูมินา( $Al_2O_3$ )ขนาด 2.5 ไมครอนที่ละลายในน้ำซึ่งจะเป็นส่วนที่สัมผัสกับชิ้นสาร โดยตรง เป็นหมุนนี้จะยึดติดกับมอเตอร์ที่มีวงจควบคุมความเร็วได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 9.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

ในการขัดขึ้นสารนั้นส่วนสำคัญคือจะต้องมีการฉีดน้ำที่ผสมผงอลูมินาเป็นระยะๆ เพื่อให้ผ้าขัดไม่แห้งในขณะที่ขัดขึ้นสารซึ่งจะทำให้ผิวหน้าของสารเสียหายได้ดังนั้นเราจะต้องมีการควบคุมการฉีดน้ำในขณะที่ขัด โดยจะใช้มอเตอร์ฉีดน้ำของรถยนต์มาต่อเข้ากับกระบอกน้ำที่ผสมผงอลูมินา แล้วควบคุมการฉีดน้ำของมอเตอร์โดยจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์เป็นระยะๆตามต้องการ

### 9.2.2 ขั้นตอนการขัดแผ่นชั้นสารกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$

ชั้นสารที่ใช้ในการศึกษานี้ต้องขัดให้เป็นมันวาวและให้เหลือร่องรอยการขัดข่วนน้อยที่สุดเพื่อลดจุดบกพร่อง (defects) บนผิวหน้าของชั้นแผ่นสาร ขั้นตอนการขัดชั้นสารทำโดยนำชั้นสารที่ผ่านขั้นตอนการตัดมาแล้วขัดบนกระดาษทรายละเอียด จนที่ผิวหน้าเรียบทั้งสองด้าน จากนั้นนำชั้นสารไปติดบนแผ่นโลหะด้วยการใช้เทียนไขเป็นตัวยึด โดยจะทำให้เป็นโลหะร้อนด้วยเปลวไฟ ต่อจากนั้นจึงทาเทียนไขบนแผ่นโลหะเล็กน้อย วางชั้นสารลงตรงกลางเป็นโลหะ ทิ้งไว้จนกระทั่งเป็นโลหะเย็นลง ใช้กระดาษทรายละเอียดขัดเทียนไขที่ปกคลุมผิวหน้าของชั้นสารออกแล้วจึงเอาเป็นโลหะวางบนแผ่นหมุนของเครื่องขัดที่คลุมผิวหน้าด้วยผ้าป่านเนื้อหยาบที่ทำงานด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งวิธีการสร้างเครื่องขัดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ขณะที่แทนหมุนหมุนไป ชั้นสารจะต้องสัมผัสกับผ้าขัดตลอดเวลา โดยจะฉีดน้ำผสมผงขัดอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ขนาด 0.25 ไมครอน เป็นระยะสม่ำเสมอเพื่อเป็นตัวช่วยในการขัดผิวหน้าของชั้นสาร การขัดแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง

เมื่อผิวหน้าของชั้นสารเรียบสม่ำเสมอมันวาวดีแล้วจึงนำเอาเป็นโลหะลงไฟเพื่อให้เทียนไขละลาย ชั้นผลึกจะหลุดออกมาได้โดยง่าย จากนั้นนำไปล้างให้สะอาดตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. แช่ในอะซิโตนเดือดนานประมาณ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
2. แช่ในเมธานอลเดือดนานประมาณ 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
3. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water, D.I.) หลายๆ ครั้ง
4. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

ผิวหน้าของผลึกจะสะอาดพอที่จะนำไปกัดผิวหน้า (etching) ด้วยสารละลายเคมีในขั้นตอนต่อไป

### 9.2.3 การกัดผิวหน้าของชั้นผลึกด้วยสารละลายเคมี (chemical etching solution)

การกัดผิวหน้าของชั้นผลึกด้วยสารละลายเคมีเพื่อให้ผิวหน้าเรียบ สะอาด และขจัดผิวหน้าที่ชำรุดเสียหายเนื่องจากการขัด รายละเอียดในทางปฏิบัติมีดังนี้

1. วางชั้นผลึก  $\text{CuInSe}_2$  บนฐานเทฟลอน (teflon) ที่เตรียมไว้สำหรับวางให้ผิวหน้าผลึกเอียงประมาณ 45 องศาแล้วนำไปจุ่มลงในสารละลายเคมีจาก HCl จำนวน 13.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร  $\text{HNO}_3$  จำนวน 7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร และน้ำดีไอออ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนซ์ จำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่เตรียมไว้นานประมาณ 30 นาที โดยใช้เวลาในการจุ่มนาน 5 วินาที จึงรีบยกขึ้นเพื่อปฏิบัติตามขั้นตอนต่อไปทันที

2. จุ่มลงในเมธานอลนาน 5 วินาที จึงยกขึ้น
3. ล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์หลายๆครั้ง
4. ปฏิบัติซ้ำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 อีกครั้งหนึ่ง
5. เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์

### 9.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก

ถ้าผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้อยู่ในสภาวะสมดุลเราสามารถหาค่าคงที่ได้จากวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบของผลึกผง (powder) โดยความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (wavelength, Cu- $K_\alpha$ ) ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1.5405 อังสตรอม จากการวิเคราะห์ความเข้มของเส้นเลี้ยวเบนที่ปรากฏบนฟิล์มเทียบกับไฟล์ (file) มาตรฐานของ  $\text{CuInSe}_2$  ในภาคผนวก ข. จะทำให้ทราบว่าเส้นเหล่านี้เลี้ยวเบนมาจากระนาบใดบ้างซึ่งสามารถที่จะนำข้อมูลนี้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกตามต้องการ

เมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านเข้าไปในผลึกผง รังสีเอ็กซ์นี้จะเลี้ยวเบนออกมาเนื่องจากระนาบต่างๆ ที่เอียงทำมุมกับแนวรังสีตกกระทบเป็นมุมที่สอดคล้องกับกฎของแบรกก์ดังสมการ

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (9.1)$$

สำหรับ  $\text{CuInSe}_2$  นี้เป็นสารประกอบธาตุโคไฟโรที่ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้จะได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ( $\lambda$ ) มุมของแบรกก์ ( $\theta$ ) ระนาบ (h,k,l) ต่างๆของผลึก และค่าคงที่ของผลึก (a,c) ดังสมการ

$$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right) = \frac{1}{4} \left(\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}\right) \quad (9.2)$$

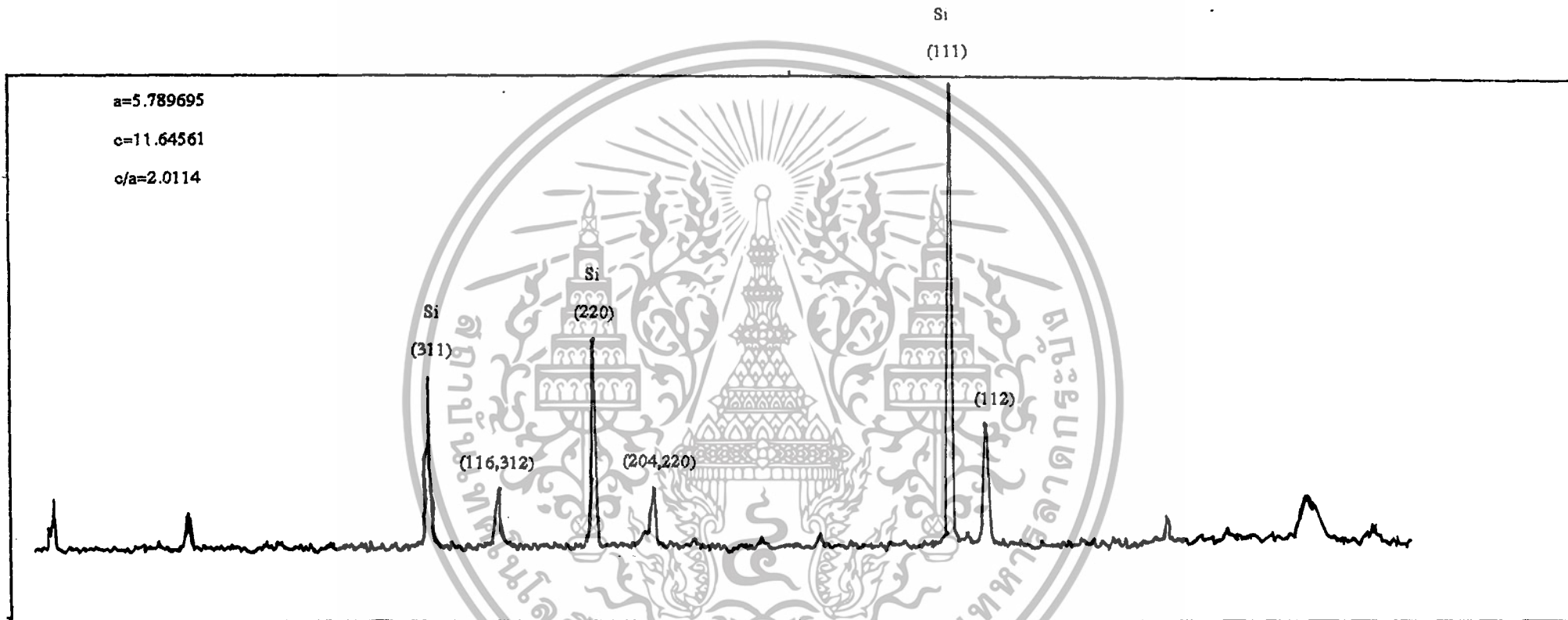
จากเส้นการเลี้ยวเบนที่ปรากฏบนกระดาศกราฟทำให้เราได้ค่ามุมของแบรกก์หรือค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{obs}$  แต่  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{obs}$  นี้ยังนำไปใช้คำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกทันทีไม่ได้เนื่องมาจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากสภาวะแวดล้อมที่ทำให้การทดลองแต่ละครั้งแตกต่างกัน หรือการจัดวางผลึกไม่อยู่ที่ศูนย์กลางของกล้องเป็นต้น ดังนั้นเราจึงแก้ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวโดยการเขียนกราฟระหว่างค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si}$  กับค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si,obs}$  โดยที่ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si}$  นี้เกิดจากผลต่างของ  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si,cal}$  ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้มุมของแบรกก์ที่เป็นค่ามาตรฐานกับค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si,obs}$  ซึ่งได้มาจากค่ามุมที่วัดไว้จากเส้นการเลี้ยวเบนบนกระดาศกราฟ เพราะฉะนั้นค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{corr}$  ที่แท้จริงจะได้จากค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{obs}$  รวมกับค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si}$  ที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si}$  กับ  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{Si,obs}$  ดังกล่าวและนำค่า  $\left(\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}\right)_{corr}$  ที่ระนาบ (h,k,l) ต่างๆ แทนลงสมการที่ (9.2) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) ค่าคงที่ของโครงผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้มีค่า a เท่ากับ 5.789(7) อังสตรอม ค่า c เท่ากับ 11.645(6) อังสตรอม และ  $c/a$  เท่ากับ 2.01



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



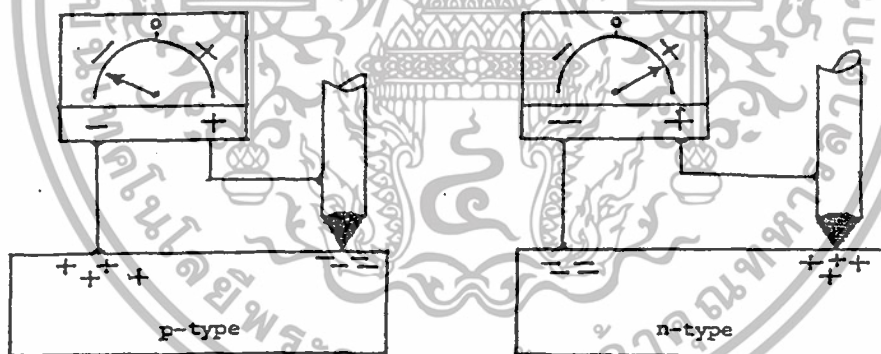
รูปที่ 9.9 แสดงความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากผลึกผง  $n\text{-CuInSe}_2$  กับองศา  $2\theta$

## 9.4 การตรวจชนิดการนำไฟฟ้าและวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

### 9.4.1 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีจี้ความร้อน(hot-probe method)

[24]

วิธีจี้ความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่าผลึกสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็นหรือพี ขั้นตอนในการปฏิบัติคือ นำชิ้นผลึกหรือก้อนผลึก (bulk cracks) ที่ต้องการตรวจสอบวางบนแผ่นอลูมิเนียม นำขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ต่อเข้ากับแผ่นโลหะ จี้หัวแร้งบัดกรีลงไปบนชิ้นผลึกหรือก้อนผลึกโดยไม่ให้สัมผัสกับแผ่นโลหะ โยงสายไฟจากหัวแร้งเข้ากับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์ ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวกสารกึ่งตัวนำนั้นจะเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ซึ่งเย็นกว่า จึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีเข็มของโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบเนื่องจากโฮลเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่าจึงทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบดังกล่าว



รูปที่ 9.10 แสดงการตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีจี้ความร้อน[24]

### 9.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอร์เพาว์[21]

จากการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าเราพบว่าไม่สามารถจะวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนชิ้นสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ได้โดยตรงเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารกึ่งตัวนำน้อยมากจนวัดค่าได้ยาก แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อของปลายเข็มโลหะที่ใช้ทำขั้วสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ รอยต่อนี้จึงขัดขวางการไหลของกระแสเพื่อที่จะวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำให้ได้ ต้องมีการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก่อนในที่นี้ใช้โลหะอินเดียม และ โลหะผสมของอินเดียม (In-Pb, In-Sn-Cd) ทำรอยต่อ เป็นจุดจำนวนสี่จุดที่ขอบของชิ้นสารจากนั้นจึงใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนโลหะทั้งสี่จุด วัดกระแส  $I_{MN}$  ค่าต่างๆและความต่างศักย์  $V_{PO}$  รวมทั้งค่ากระแส  $I_{NO}$  และความต่างศักย์  $V_{MP}$  นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อหาค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ดังรูปที่ สภาพต้านทานไฟฟ้าจะหาค่าได้เมื่อทราบความหนาของชิ้นสาร (d) ดังสมการ

$$\rho = \frac{\pi d (R_{MN,OP} + R_{NO,MP})}{\ln 2} \cdot \frac{R_{MN,OP}}{2 R_{NO,MP}} \quad (9.3)$$

จากการศึกษารอยต่อระหว่างโลหะอินเดียมและโลหะผสมอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  พบว่าเป็นรอยต่อแบบ โอห์มมิกในช่วงกระแสค่าไม่สูงนัก แต่กระนั้นก็ตามเราสามารถที่จะวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ตรงใดที่ผลของรอยต่อที่ขัดขวางการไหลของกระแสไม่ไปรบกวนเส้นสมตักย์จนทำให้ค่าความต่างศักย์  $V_{OP}$  และ  $V_{MP}$  ที่วัดได้มีค่าผิดไป

ตารางที่ 9.2 แสดงชนิดและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  ที่เตรียมได้จากวิธีไดเรกชันัล ฟริชชิง โดยวิธีลดอุณหภูมิเตาในแนวเฉียงประมาณ 5 องศา

หมายเลขของสาร	ชนิดของสารกึ่งตัวนำ $CuInSe_2$	สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega$ -cm)
p#1(1)	p	1.7
p#2(1)	p	0.3
n#1(1)	n	3.1
p#1(2)	p	0.2
p#2(2)	p	0.4
n#1(2)	n	0.1
p#1(3)	p	1.3
p#2(3)	p	2.3
n#1(3)	n	9.0
*p#2(3)	p	1.4K
*n#1(3)	n	0.9K

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก

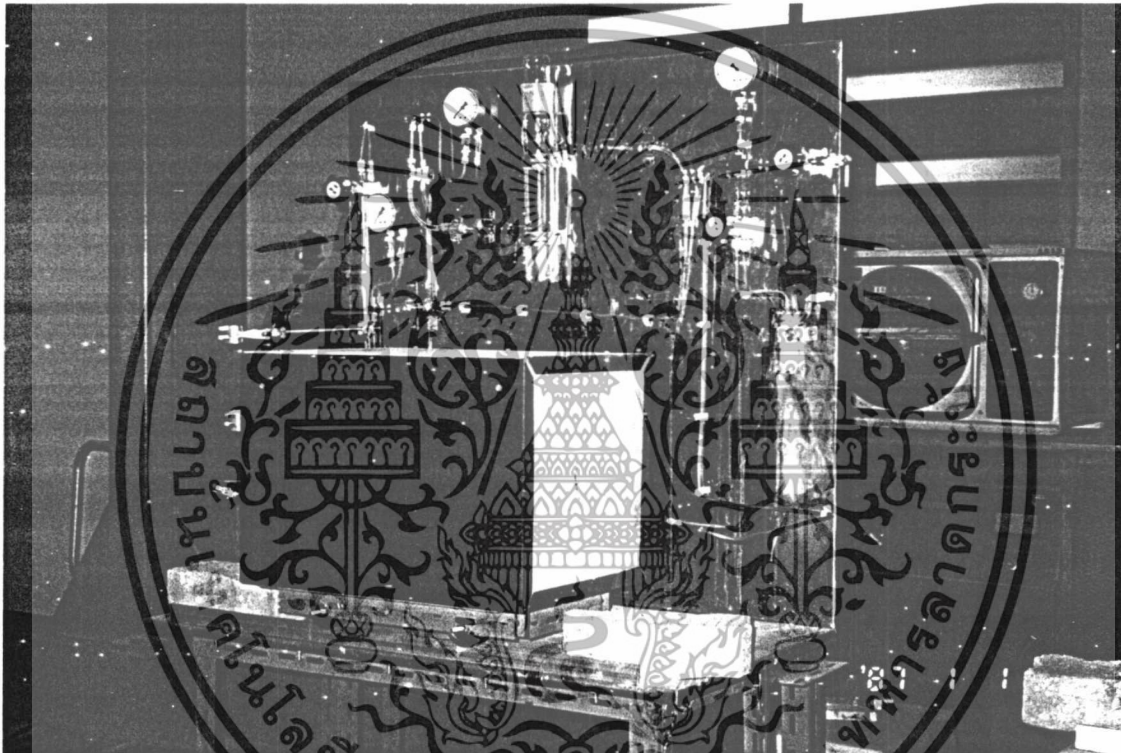
### 9.5.1 การแอนนีลสาร

เพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมขึ้นครั้งนี้เราเลือกใช้โลหะอินเดียม (In) กับโลหะผสมของอินเดียม(In-Pb, In-Sn-Cd)เนื่องจากโลหะเหล่านี้มักใช้ทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปก่อนที่จะนำ In มาใช้งานควรทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยอะซิโตนหลายๆครั้งแล้วจึงนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อลดให้ติดบนชิ้นผลึกที่เตรียมผิวหน้าผลึกให้สะอาด โดยการกัดด้วยสารละลายเคมี

ขั้นต่อไปคือนำเอาชิ้นผลึกหรือบางครั้งเรียกว่าชิ้นสารที่กัดด้วย In, In-Pb, In-Sn-Cd ติดบนผิวหน้าเรียบร้อยแล้วเหล่านี้ไปแอนนีลภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ไหลถ่ายเทตลอดเวลา เตาที่ใช้แอนนีลประกอบไปด้วยตัวเตาซึ่งสามารถเลื่อนไปบนรางคู่ขนานและมีท่อแก้วควอทซ์ยาวประมาณ 50 เซนติเมตรสอดผ่านเข้าไปในเตา ยึดปลายทั้งสองข้างของท่อแก้วควอทซ์ด้วยที่จับที่ติดกับแท่นยึดให้ท่อแก้วควอทซ์อยู่นิ่ง นำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบแก๊สเพื่อให้แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ไหลเข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ได้ทางปลายด้านหนึ่ง และออกทางปลายอีกด้านหนึ่ง นำชิ้นสารใส่เข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ทำการดูดเอาอากาศภายในท่อแก้วควอทซ์ออก (evacuate) ทางปั๊มพีโรตารี และบรรจุ (refill) แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เข้าไปแทนที่ ทำการดูดเอาอากาศออกและบรรจุเข้าแทนที่กระทำเช่นนี้ประมาณ 10 ครั้งเพื่อให้แก๊สออกซิเจนเหลืออยู่น้อยที่สุด หลังจากนั้นจึงปล่อยแก๊สไนโตรเจนไหลเข้าและปล่อยออกทิ้งด้วยอัตรา 1 ฟองอากาศต่อวินาที โดยปรับให้ความดันภายในท่อแก้วควอทซ์มากกว่าความดันปกติเล็กน้อย ที่ทำเช่นนี้เพื่อป้องกันอากาศจากภายนอกรั่ว (leak) ตามข้อต่อ (connector) เข้าสู่ระบบ อีกทั้งขณะที่อุณหภูมิของเตาสูงขึ้นจะทำให้ความดันของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ในท่อแก้วควอทซ์เพิ่มขึ้นอันอาจทำให้ตัวคัปปลิง (O-ring vacuum coupling) ที่ยึดปลายทั้งสองของท่อหลุดออกจากท่อแก้วควอทซ์ได้ ลำดับต่อมาก็คือเลื่อนเตาให้ห่างจากชิ้นสารมากที่สุดแล้วจึงปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ตั้งอุณหภูมิให้กับเครื่องตั้งอุณหภูมิเพื่อปรับให้อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้นเป็นระยะจนถึง 500 องศาเซลเซียสปล่อยทิ้งไว้ 15 นาทีเพื่อให้เตาอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนแล้วจึงเลื่อนเตาไปเพื่อให้ชิ้นสารอยู่ที่ตำแหน่งกลางเตา แอนนีลชิ้นสารเป็นเวลานาน 20 นาที จึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตา ปล่อยให้เตาค่อยๆเย็นลงจึงสามารถนำเอาชิ้นสารออกมาทดลองในขั้นต่อไป

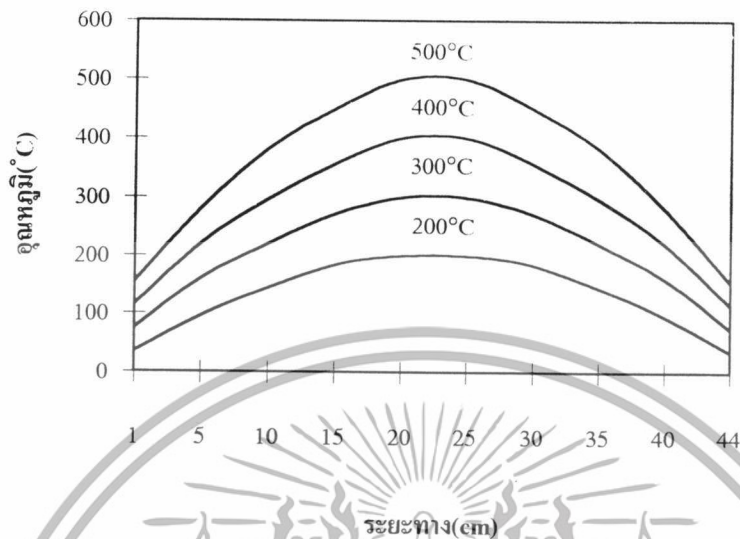
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของชิ้นสารที่ได้จากการแอนนีสแล้วจะเป็นผิวด้าน ไม่สะท้อนแสงมันเงาเหมือนก่อนที่จะแอนนีสเนื่องจากว่ามีส่วนประกอบ (component) บางอย่างหลุดออกมาจากผิวของสารกึ่งตัวนำ เช่น  $\text{Se}_2$  และ  $\text{In}_2\text{Se}$  ส่วน In ที่ก่อกับบนชิ้นสารจะเป็นรูปครึ่งทรงกลม ผิววเป็นมันวาว มีรูพรุนบ้างเล็กน้อย ยึดแน่นกับสารกึ่งตัวนำได้ดีพร้อมที่จะนำไปเชื่อมต่อระหว่างจุดด้วยลวดในขั้นต่อไป



รูปที่ 9.11 แสดงระบบเตาที่ใช้ในการแอนนีสสารพร้อมทั้งระบบนำแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



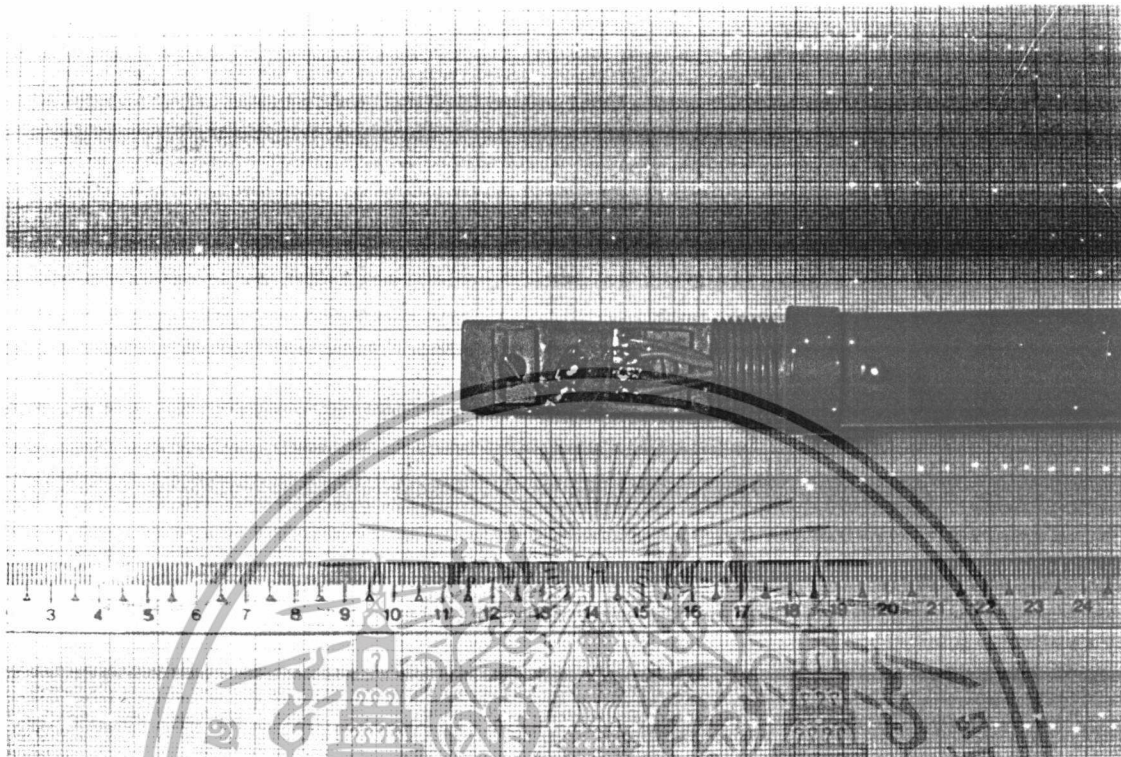
รูปที่ 9.12 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซนเดียวที่ใช้ในการแอนนิลสาร

### 9.5.2 การเตรียมแผ่นรองชิ้นสาร

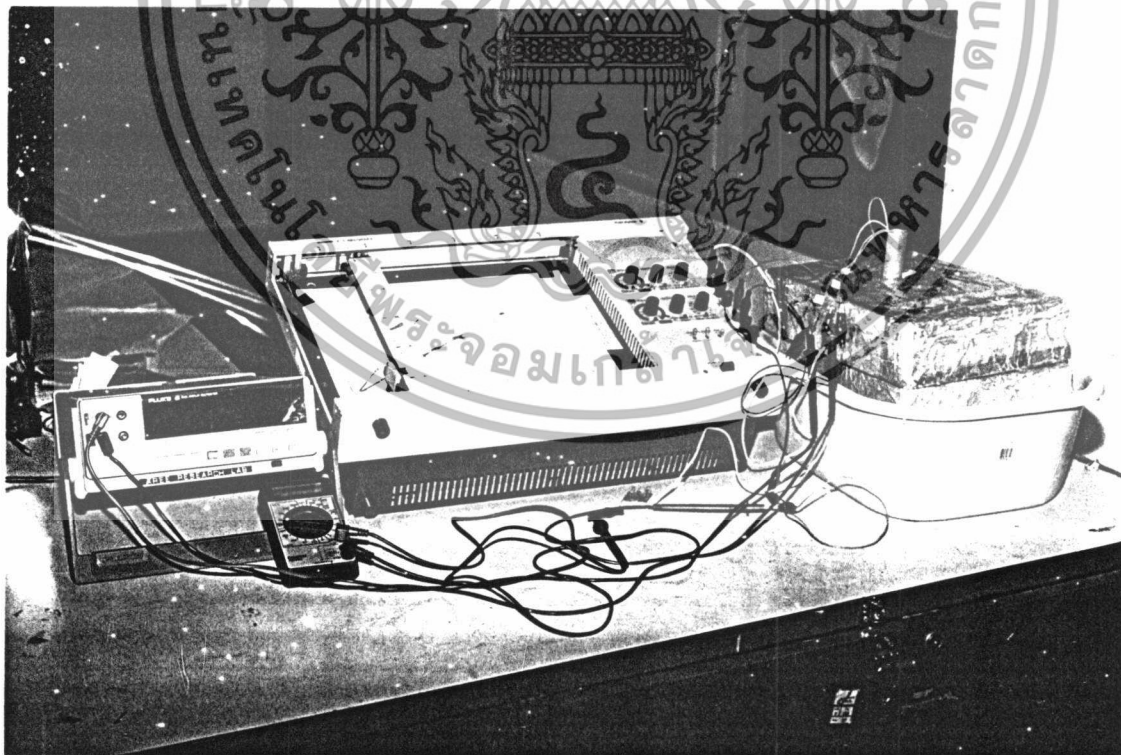
ก่อนที่จะนำเอาชิ้นสารไปเชื่อมต่อระหว่างจุดเข้าด้วยกันเราจะต้องเตรียมแผ่นรองชิ้นสารซึ่งทำจากทองแดงทาคัวยกริสตงบนแผ่นทองแดงแล้วปิดทับด้วยไมก้าแผ่นบางๆ (ไมก้าและกริสเป็นตัวนำความร้อนที่ดีแต่เป็นฉนวนไฟฟ้า) ส่วนที่ทองแดงจะแยกส่วนโดยแต่ละส่วนเชื่อมต่อสายไฟออกไปเพื่อทำขั้วไฟฟ้าซึ่งทำจากลวดเส้นเล็ก นำชิ้นสารวางบนแผ่นไมก้าเพื่อเชื่อมต่อระหว่างจุดโดยใช้กาวเงินนำไฟฟ้า (silver paint) เป็นตัวช่วยยึดติดระหว่างขั้วไฟฟ้ากับลวด ซึ่งกาวเงินสามารถนำไฟฟ้าได้

ต่อจากนั้นจึงนำแท่งทองแดงยาวที่โยงด้วยลวดสี่เส้นไปจุ่มในไนโตรเจนเหลว ความร้อนจะถ่ายเทออกจากชิ้นสารผ่านไมก้าผ่านกริสสู่แท่งทองแดงเข้าสู่ไนโตรเจนเหลวด้วยขบวนการนำความร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวเท่ากับ 77 องศาเคลวิน ดังนั้นชิ้นสารจะเย็นลงตามไปด้วย ในการทดลองจะปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าทางรอยต่อพื้นที่ใหญ่ผ่านชิ้นสารถึงตัวนำและออกทางรอยต่อพื้นที่เล็ก ซึ่งในที่นี้เราจะเรียกวิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้างกล่าวนี้ว่าไบอัสตรงแต่ถ้าให้กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้ามจะเรียกว่าไบอัสกลับทาง การไบอัสให้กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นโดยการปรับค่าความต้านทาน อ่านค่ากระแสและความต่างศักย์ผ่านทางแอมมิเตอร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.13 แสดงขั้วสายที่วางอยู่บนแผ่นรองและมีการเชื่อมต่อระหว่างจุดของขั้ว



รูปที่ 9.14 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแส-ความต่างศักย์ (I-V) ของสิ่งประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9.5.3 รายละเอียดในการทดลองและผลการทดลอง

ทำการทดลองวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์ของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิก (ดังรูปที่ 9.14) ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน (อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว) ทำการไบอัสตรงและปรับค่าความต้านทาน R เพื่อให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น สับสวิตช์เพื่อกลับขั้วไฟฟ้า(ไบอัสกลับทาง) เพื่อหาว่าที่กระแสค่าใดจะได้รับความต่างศักย์เนื่องจากการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากัน เขียนกราฟระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของการไบอัสทั้งสองในช่วงกระแสตั้งแต่ค่าเป็นศูนย์จนกระทั่งถึงค่าที่ทำให้ความต่างศักย์ทั้งสองไม่เท่ากัน ค่ากระแสที่ทำให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงและไบอัสกลับทางเริ่มมีค่าไม่เท่ากันนี้จะเท่ากับกระแสรีชาร์ดสันที่รอยต่อพื้นที่เล็ก ดังนั้นถ้ากระแสค่าสูงกว่านี้เมื่อไบอัสตรง รอยต่อของพื้นที่เล็กจะเริ่มขัดขวางการไหลของกระแส แต่ในขณะเดียวกันถ้าสับสวิตช์เพื่อไบอัสกลับทาง รอยต่อของพื้นที่ใหญ่จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแส การขัดขวางการไหลของกระแสที่รอยต่อพื้นที่เล็กเปรียบเสมือนเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมความต้านทานของรอยต่อซึ่งเป็นผลให้ความต่างศักย์ของการไบอัสตรงไม่เท่ากับขณะไบอัสกลับทางถ้าให้กระแสมีค่าสูงกว่ากระแสรีชาร์ดสันของรอยต่อพื้นที่เล็ก ความต่างศักย์นี้จะมีค่าต่างกันมากขึ้น

เมื่ออุณหภูมิของชิ้นสารเพิ่มขึ้นเนื่องจากไนโตรเจนเหลวระเหยไปเรื่อยๆ เราสามารถวัดกระแสและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่างๆจนถึงอุณหภูมิห้องได้และพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่ากระแสที่จุดแยกของความต่างศักย์ระหว่างการไบอัสตรงกับการไบอัสกลับทางจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ

ที่อุณหภูมิห้องรอยต่อของ In กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิด n และ p จะแสดงผลในการขัดขวางการไหลของกระแสเมื่อกระแสมีค่าสูงกว่า 0.2 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 0.4 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)โดยประมาณ และไม่สามารถที่จะวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ได้เนื่องจากกระแสรีชาร์ดสันมีค่าต่ำมาก รอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิด n และ p จะพบการแยกของความต่างศักย์ที่ค่ากระแสสูงที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวซึ่งค่ากระแสที่วัดได้ประมาณ 33.75 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 0.14 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)ซึ่งจะถือว่าเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี ส่วนรอยต่อระหว่าง In-Pb กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิด n และ p นั้นจะแสดงผลการขัดขวางการไหลของกระแสที่ค่ากระแสสูงกว่า 10.75 มิลลิแอมป์ (ความหนาแน่นของกระแส 43 แอมป์ต่อ

ตารางเซนติเมตร)ที่อุณหภูมิห้องและสามารถที่จะหาค่ากระแสรีชาร์ดที่อุณหภูมิต่ำได้ซึ่งจะเห็นผลอย่างชัดเจน

ต่อมานำค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขณะไบอัสตรงและไบอัสกลับทางของค่ากระแสที่คงที่ที่อุณหภูมิต่างๆมาเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์กับอุณหภูมิ จากรูปจะเห็นว่ารอยต่อโอห์มมิกระหว่าง In-Pb กับสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในช่วงที่กระแสและอุณหภูมิต่ำอยู่ในบริเวณเส้นประเท่านั้น ถ้านำเอาค่าอุณหภูมิ ( $T_0$ ) ที่จุดที่ความต่างศักย์เริ่มแยกออกจากกันของกระแสค่าคงที่ค่าต่างๆไปเขียนกราฟระหว่าง  $I/T_0^2$  กับ  $1/T_0$  ความชันของเส้นตรงคือค่า  $q_B/k$  จากความชันของเส้นตรงนี้สามารถคำนวณความสูงของกำแพงศักย์ได้ โดยความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่างโลหะผสม In-Pbกับสารกึ่งตัวนำ p-CuInSe<sub>2</sub>#1 ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.19 อิเล็กตรอนโวลต์ โลหะIn-Pbกับp-CuInSe<sub>2</sub>#2 มีค่า0.13 อิเล็กตรอนโวลต์ และโลหะIn-Pbกับn-CuInSe<sub>2</sub>#1 มีค่า 0.16 อิเล็กตรอน โวลต์

จากกราฟถ้าพิจารณาที่ค่าความชัน โดยที่ความชันนี้คือส่วนกลับของความต้านทาน ( $1/R$ )ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe<sub>2</sub> นั้นเอง จะเห็นว่าความชันนี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ สภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำที่แปรตามอุณหภูมิจะเป็นไปตามสมการ

$$\sigma = pe\mu_n \quad (9.4)$$

ถ้าสภาพเคลื่อนได้ของโฮลในสารกึ่งตัวนำ CuInSe<sub>2</sub> มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้นสมการ(9.4) จะกลายเป็น

$$\ln\left(\frac{1}{R}\right) = \ln C - \frac{E_a}{2k} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (9.5)$$

โดยที่ C คือค่าคงที่

ดังนั้นถ้านำเอาส่วนกลับความต้านทาน( $1/R$ )ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe<sub>2</sub> ไปเขียนกราฟกับ  $(1/T)$  ความชันของเส้นเส้นตรงคือ  $-E_a/2k$  จากค่าความชันนี้เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนได้

รอยต่อแบบโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ CuInSe<sub>2</sub> ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น โดยใช้โลหะ In จะใช้ได้ในช่วงความหนาแน่นของกระแสและช่วงอุณหภูมิ ไม่สูงมากนัก สำหรับรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างโลหะผสม In-Pb กับ  $\text{CuInSe}_2$  เป็นรอยต่อที่ไม่ดีนักเนื่องจาก In-Pb มักจะหลุดจากผิว  $\text{CuInSe}_2$  ได้ง่ายอีกทั้งโลหะผสมชนิดนี้แข็งและยากต่อการเชื่อมต่อ ส่วนรอยต่อของโลหะผสม In-Sn-Cd เหมาะสมที่จะใช้ทำเป็นรอยต่อเนื่องจากยึดติดแน่นกับสารกึ่งตัวนำได้ดี จากการวัดส่วนกลับของความต้านทานของ  $\text{CuInSe}_2$  พบว่าพลังงานไอออไนซ์ของ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดพี(p- $\text{CuInSe}_2$ #1) มีค่าเท่ากับ 100 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดพี (p- $\text{CuInSe}_2$ #2) มีค่าเท่ากับ 150 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดเอ็น(n- $\text{CuInSe}_2$ #1)มีค่าเท่ากับ 100 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และ 15 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

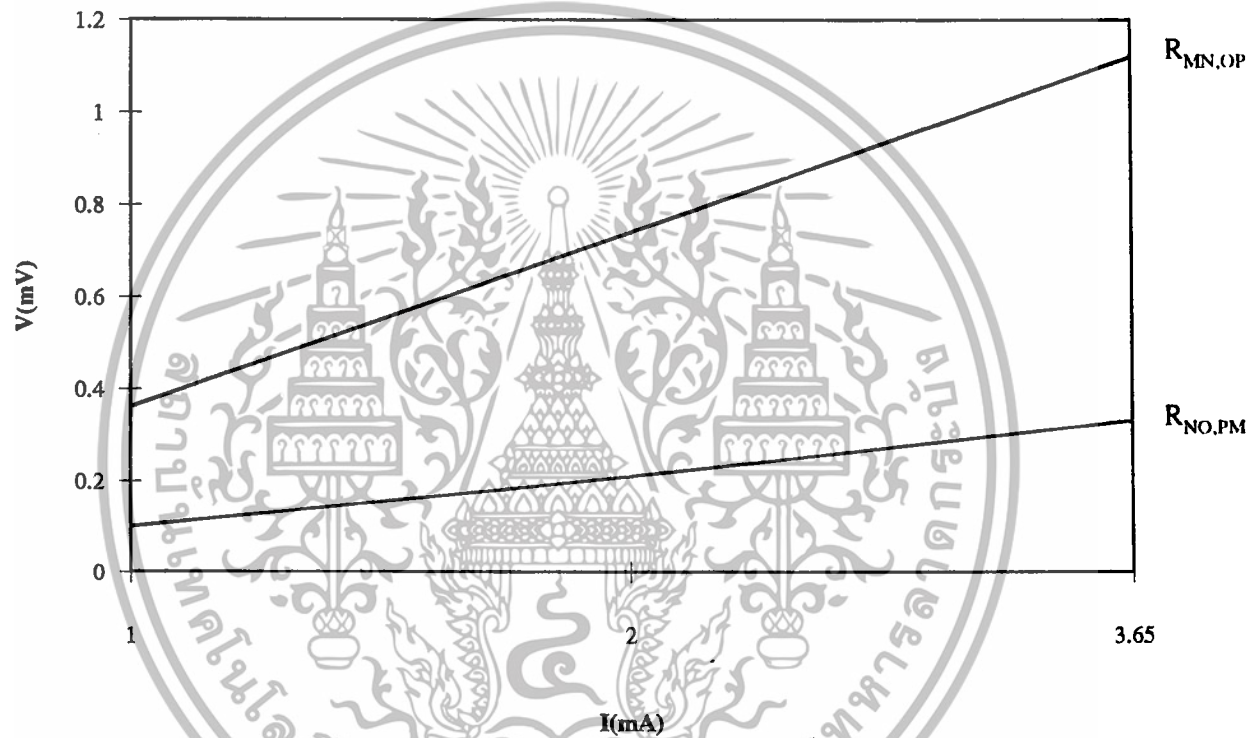
ตารางที่ 9.3 แสดงผลของการศึกษารอยต่อแบบ โห้หม่มมิกระหว่างโลหะผสมของอินเดียมกับสารกึ่งตัวนำที่วัดได้

โลหะที่ใช้ทำรอยต่อ	ชนิดของ CuInSe <sub>2</sub>	สมบัติของรอยต่อแบบ โห้หม่มมิที่วัดได้		ลักษณะของโลหะที่ใช้ทำรอยต่อ (หลังจากแอนนีสที่อุณหภูมิ 500°C)
		ความหนาแน่นของกระแส และอุณหภูมิที่ใช้ได้	ความสูงของกำแพง ศักย์ที่วัดได้	
In	p n	มีค่าต่ำกว่า 0.4mA/cm <sup>2</sup> ที่ อุณหภูมิห้อง	-	เป็นก้อน ผิวเป็นมันวาวมีรูพรุนเล็กน้อย ยึดติดแน่นกับผิวของสารกึ่งตัวนำ
In-Pb	p n	มีค่าต่ำกว่า 135mA/cm <sup>2</sup> ที่ อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ดูได้จากกราฟ	0.19eV, 0.13eV  0.16eV	ค่อนข้างแข็งและหลุดออกจากผิวของสารกึ่งตัวนำได้ง่าย
In-Sn-Cd	p n	มีค่าสูงกว่า 120mA/cm <sup>2</sup> ที่ อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	มีค่าน้อยมาก	ผิวเป็นมันวาว ยึดติดกับผิวของสารกึ่งตัวนำได้ดีและเชื่อมต่อระหว่างจุดด้วยลวดได้ง่าย

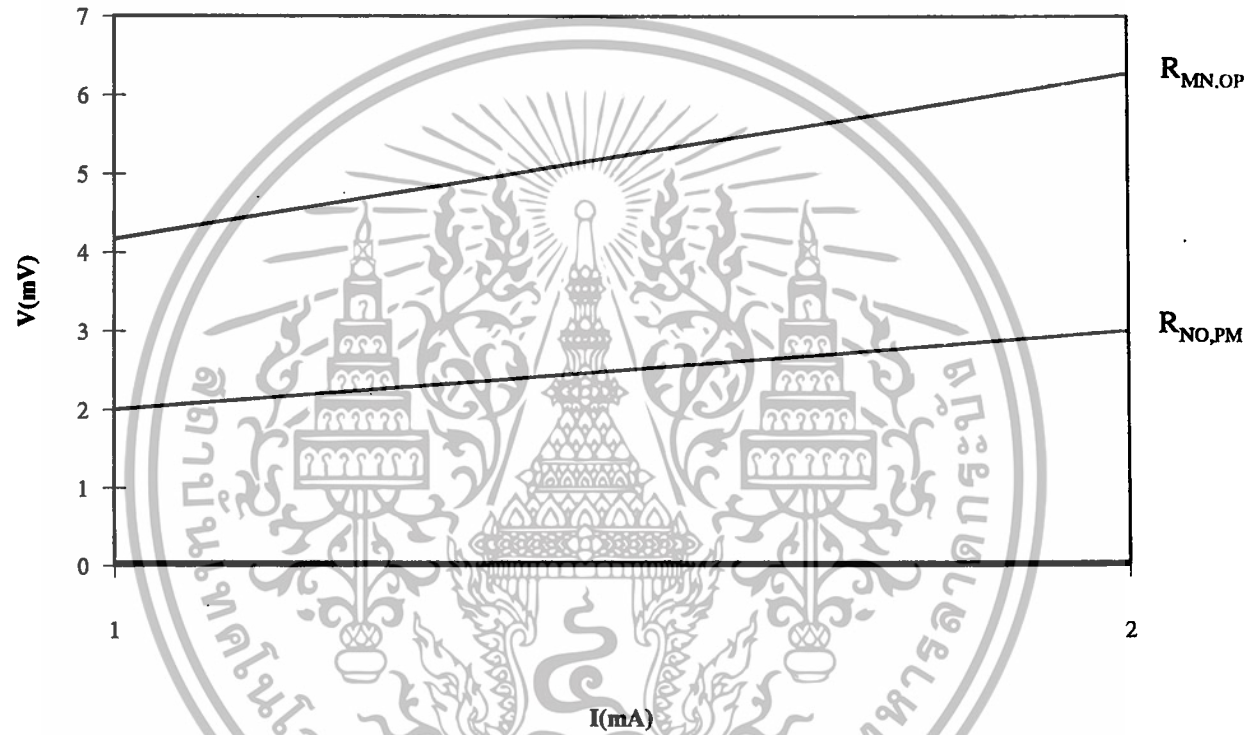
ตารางที่ 9.4 แสดงค่าพลังงาน ไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นเองเนื่องจากความบกพร่องของผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  (พลังงานมีหน่วยเป็นมิลลิอิเล็กตรอน โวลท์) ที่คำนวณได้

ชนิดของ $\text{CuInSe}_2$	พลังงาน ไอออไนซ์ของระดับสิ่งเจือปน		
	ชนิดผู้รับ( $E_a$ )		ชนิดผู้ให้( $E_d$ )
	$E_{a1}$	$E_{a2}$	$E_{d1}$
p	150	104	-
n	-	103	15

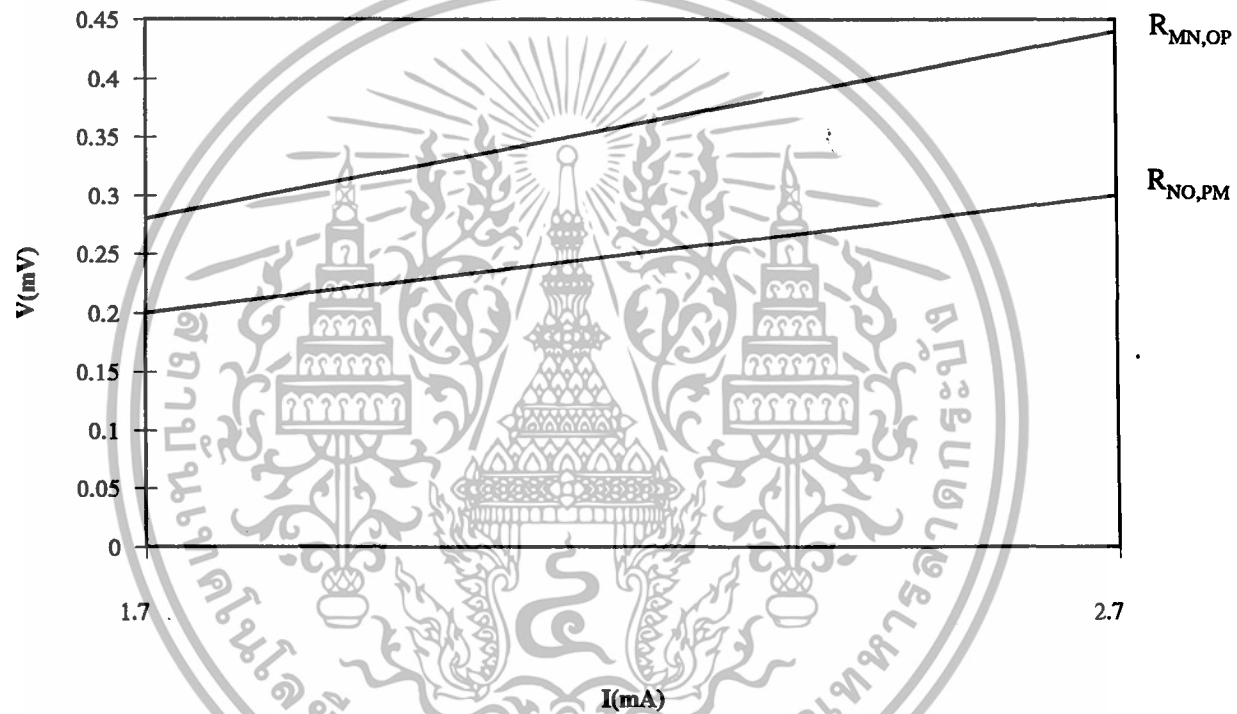
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



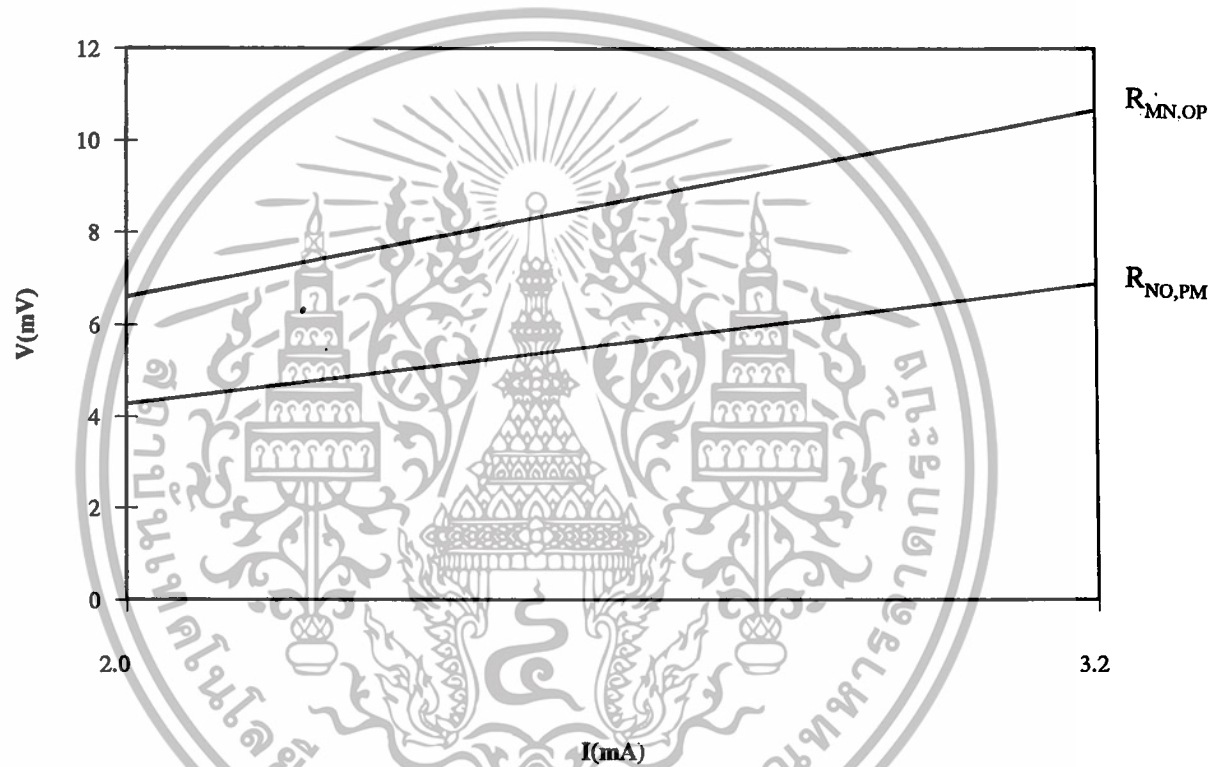
รูปที่ 9.15 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p\text{-CuInSe}_2\#1$  กับ  $\text{In-Pb}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



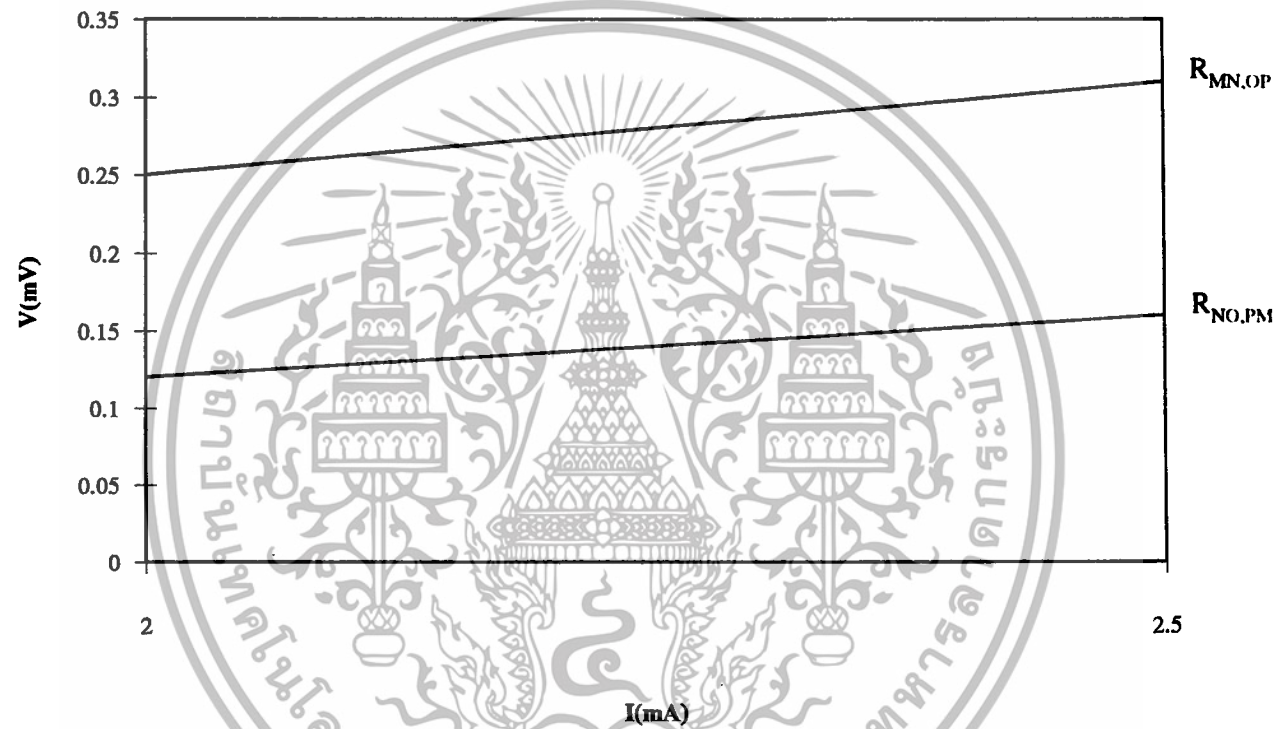
รูปที่ 9.16 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p\text{-CuInSe}_2$  กับ  $\text{In-Pb}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



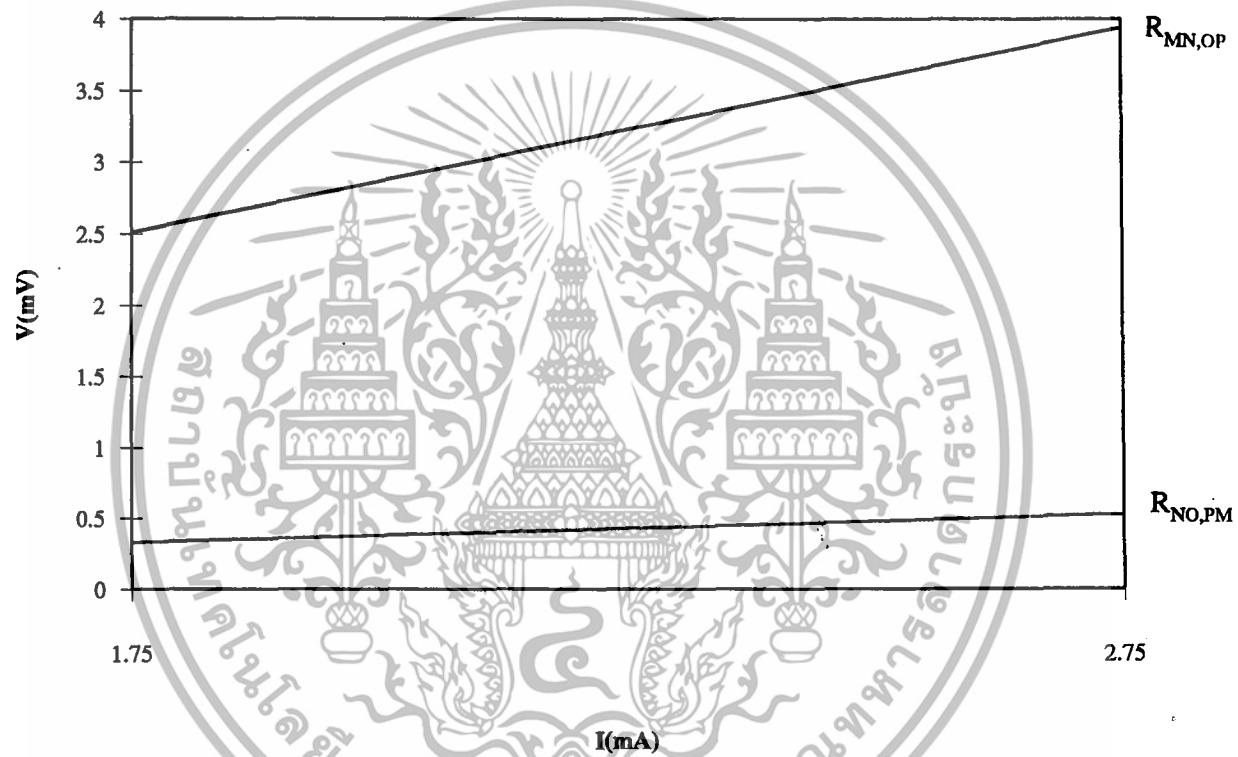
รูปที่ 9.17 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง n-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิ 30 °C



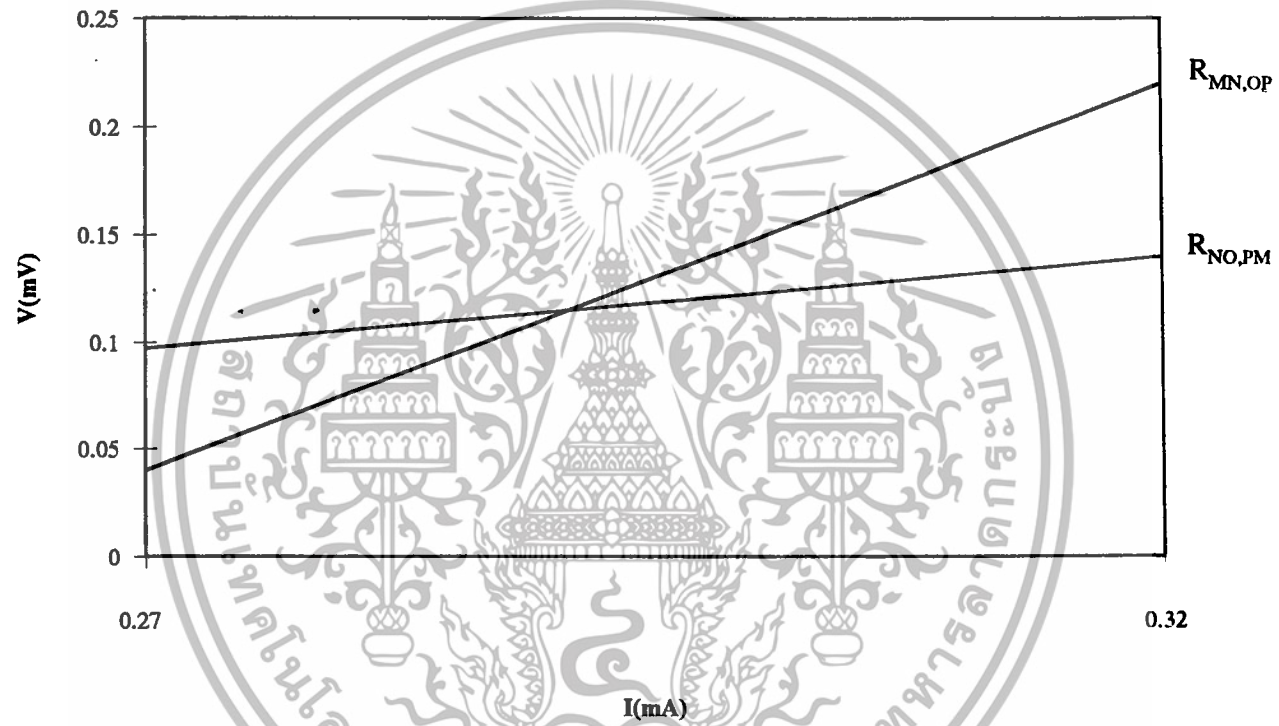
รูปที่ 9.18 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p\text{-CuInSe}_2\#1$  กับ  $\text{In-Sn-Cd}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



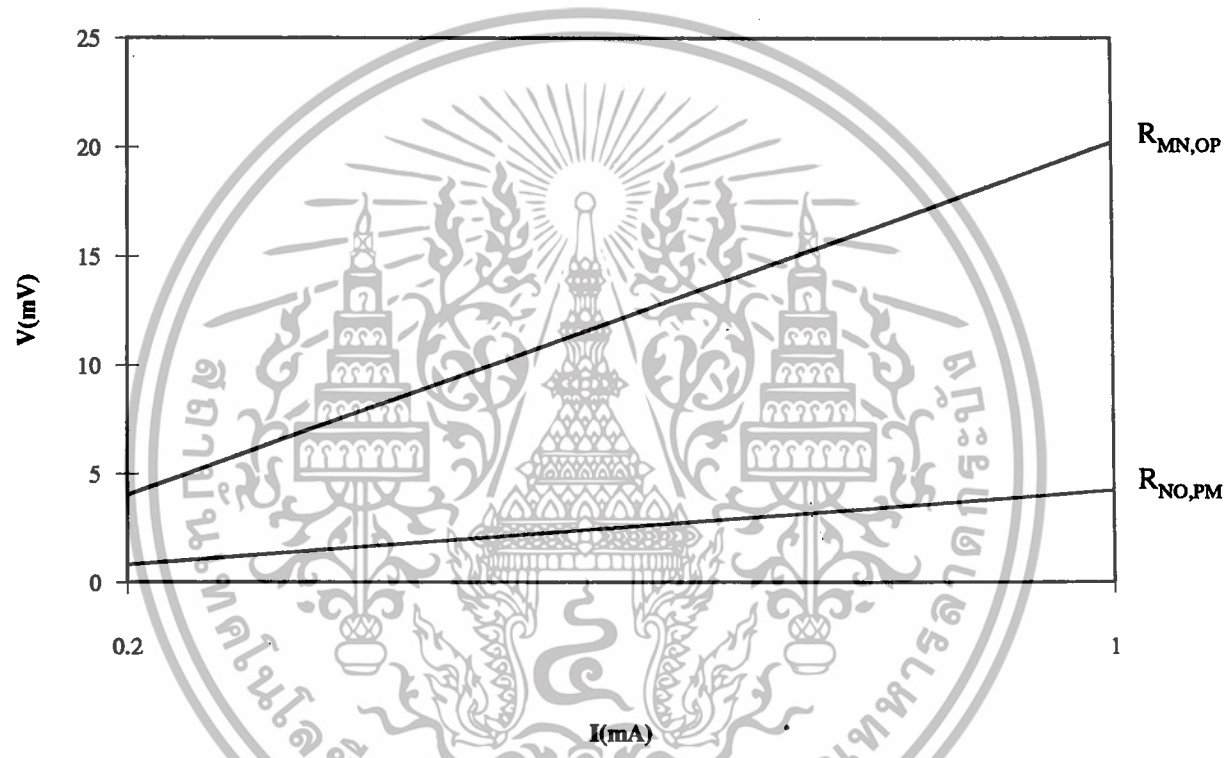
รูปที่ 9.19 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p\text{-CuInSe}_2$  กับ  $\text{In-Sn-Cd}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



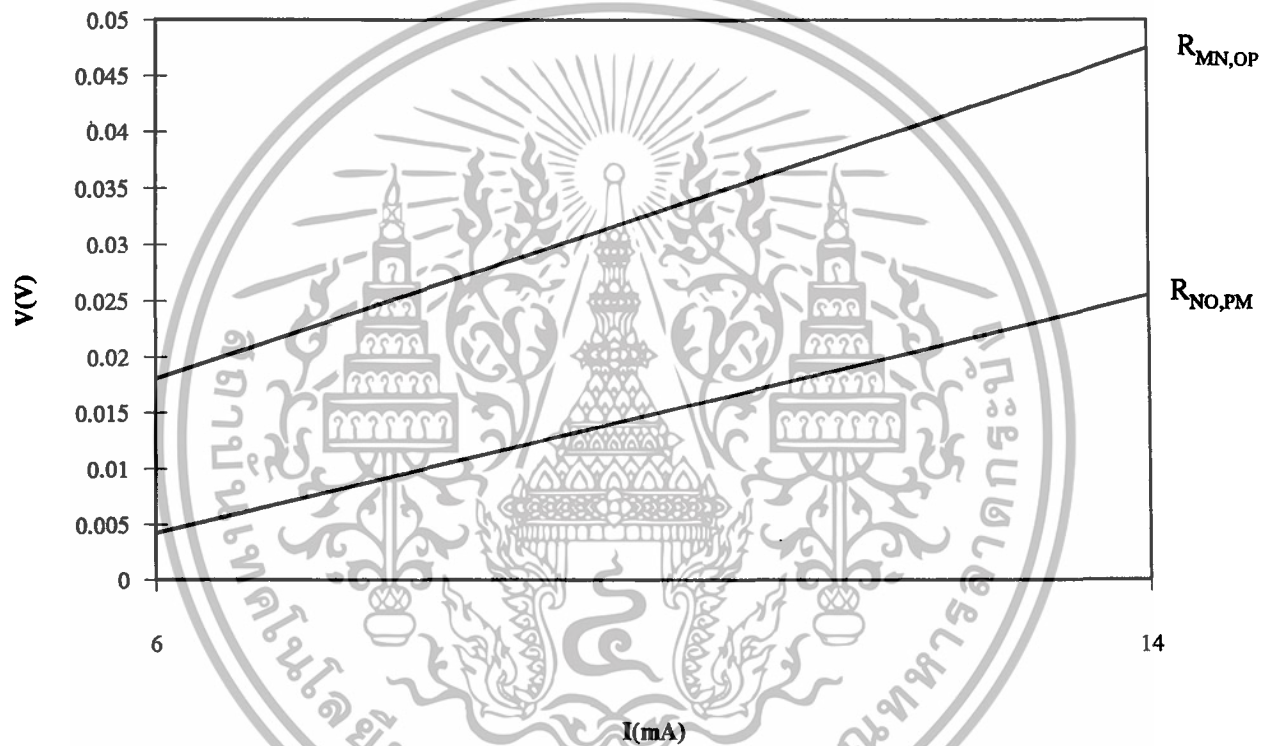
รูปที่ 9.20 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $n\text{-CuInSe}_2\#1$  กับ  $\text{In-Sn-Cd}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



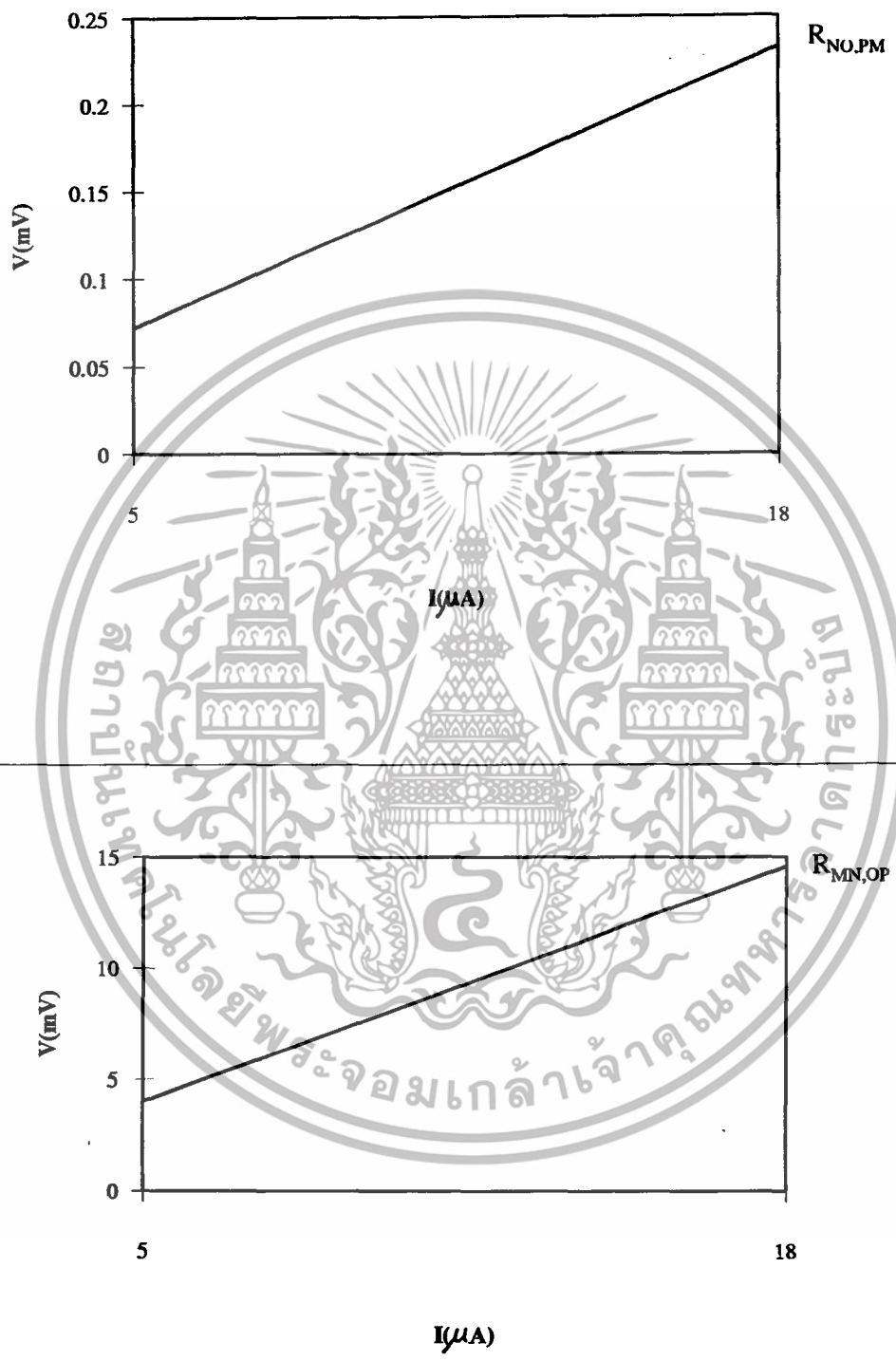
รูปที่ 9.21 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p\text{-CuInSe}_2\#1$  กับ  $\text{In}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



รูปที่ 9.22 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $p-CuInSe_2$  #2 กับ In ที่อุณหภูมิ  $30^{\circ}C$

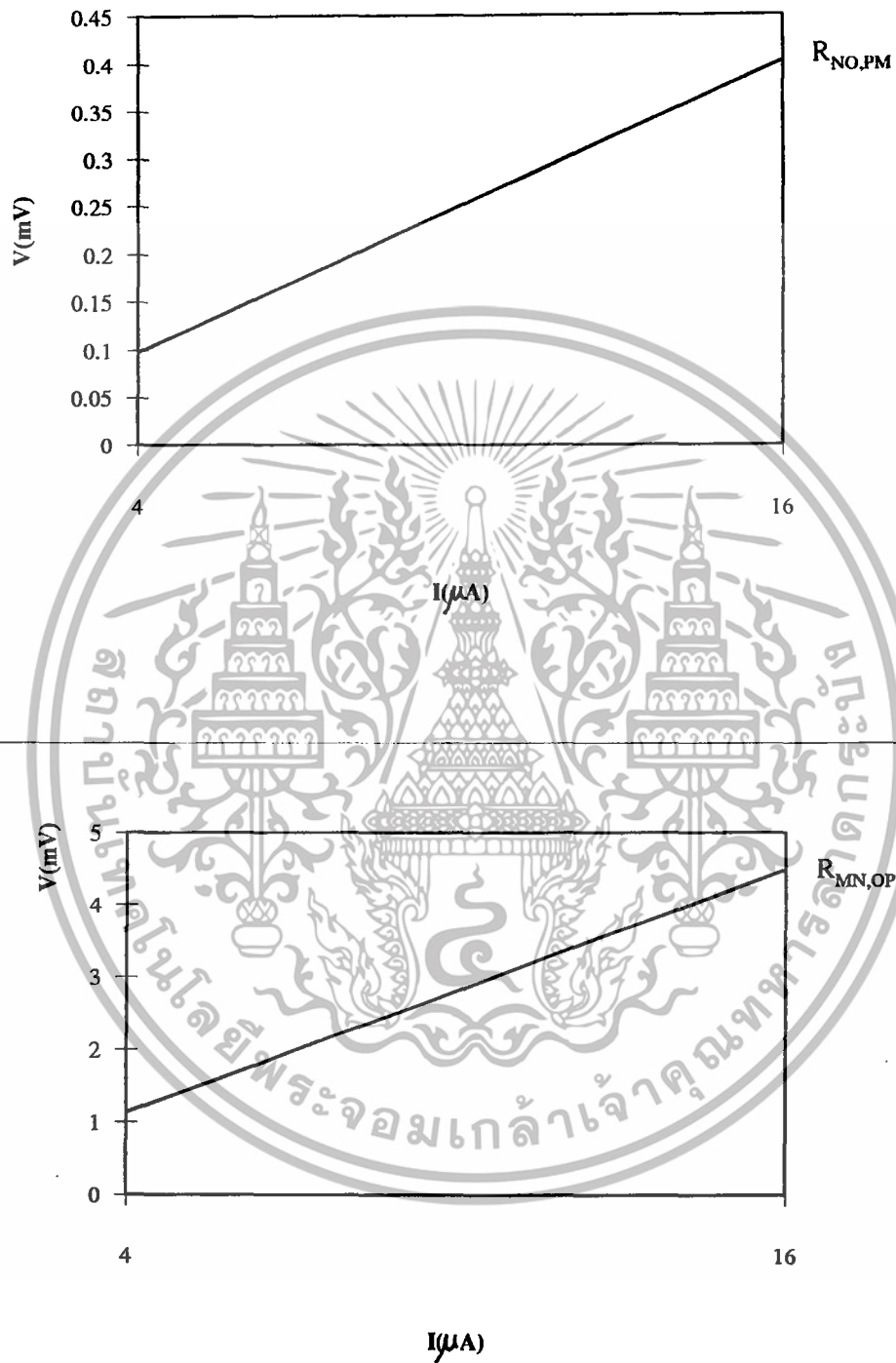


รูปที่ 9.23 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของรอยต่อระหว่างสารตัวอย่าง  $n\text{-CuInSe}_2$  #1 กับ In ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$



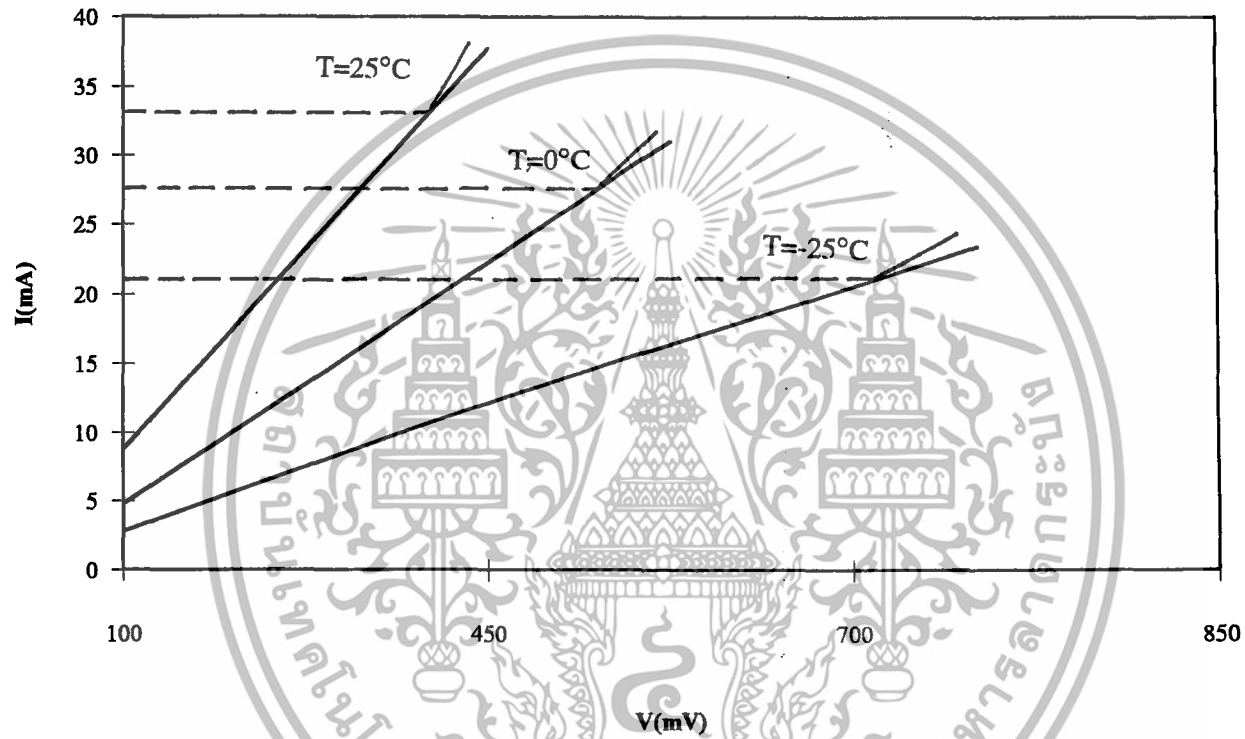
รูปที่ 9.24 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของฟิล์มบาง  $n-CuInSe_2$  ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

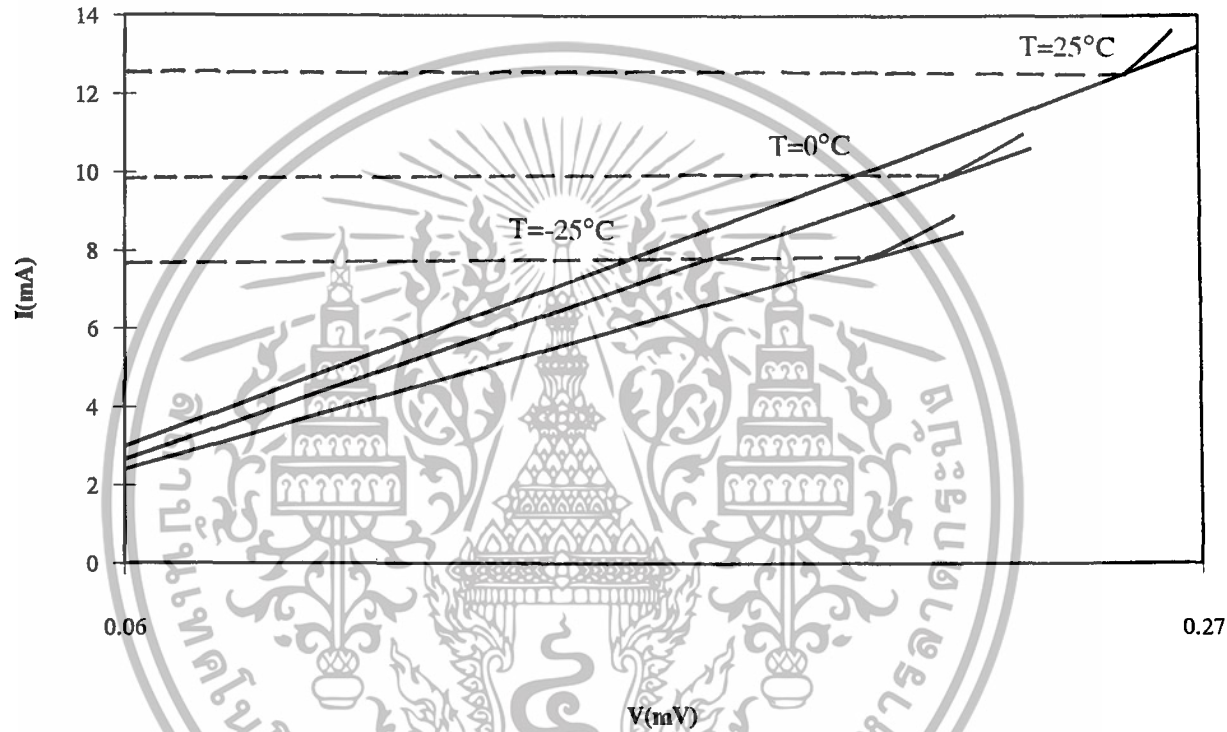


รูปที่ 9.25 กราฟแสดงค่า  $R_{MN,OP}$  และ  $R_{NO,PM}$  ของฟิล์มบาง  $p-CuInSe_2$   
ที่อุณหภูมิห้อง

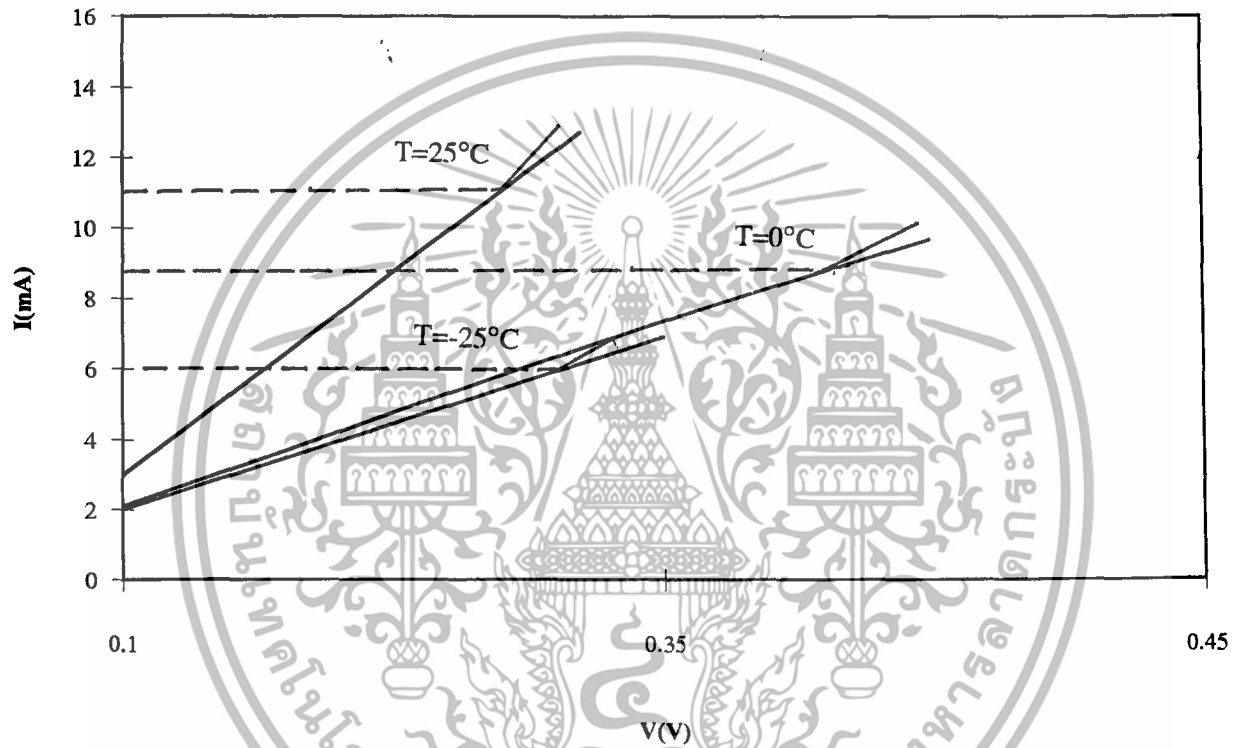
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



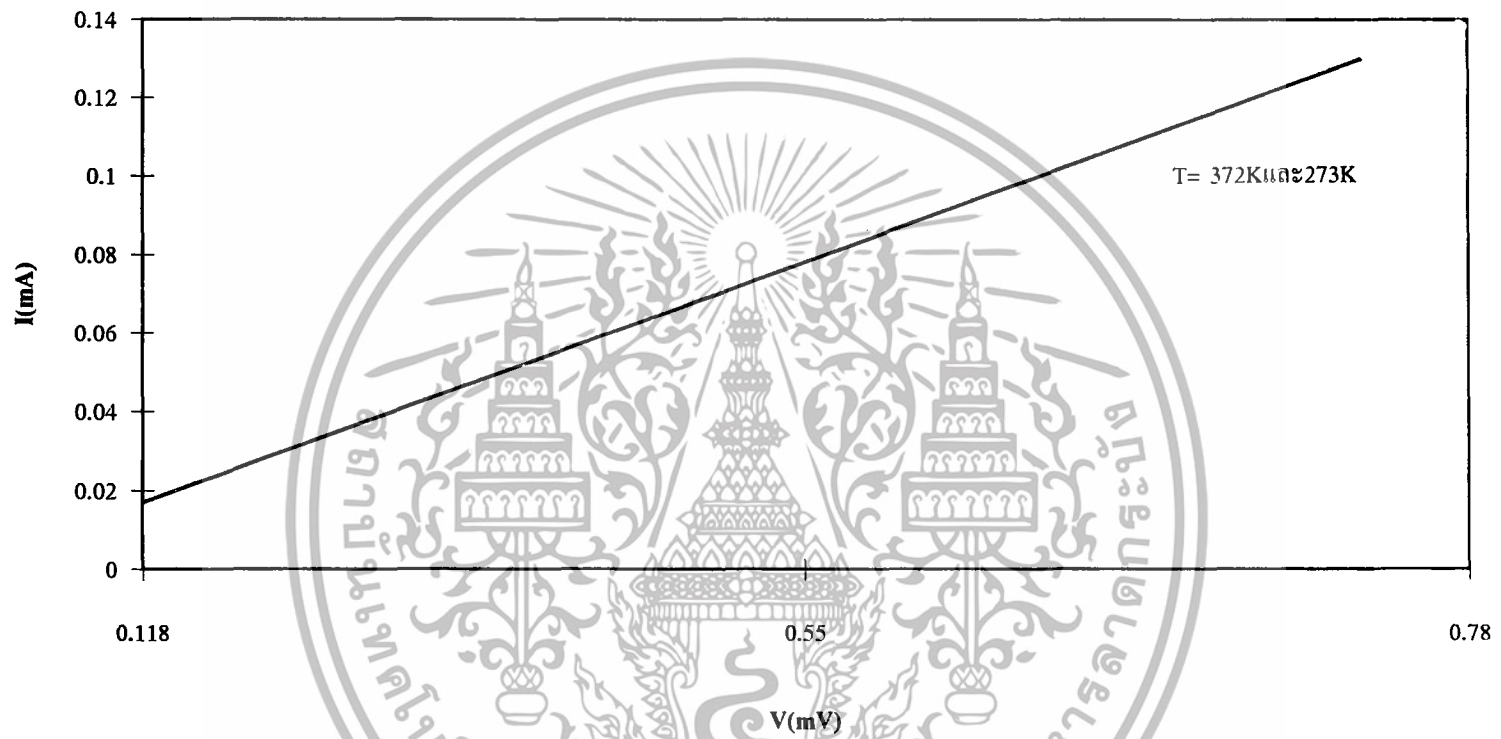
รูปที่ 9.26 แสดงค่ากระแสชาร์ตต้น ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่างๆ



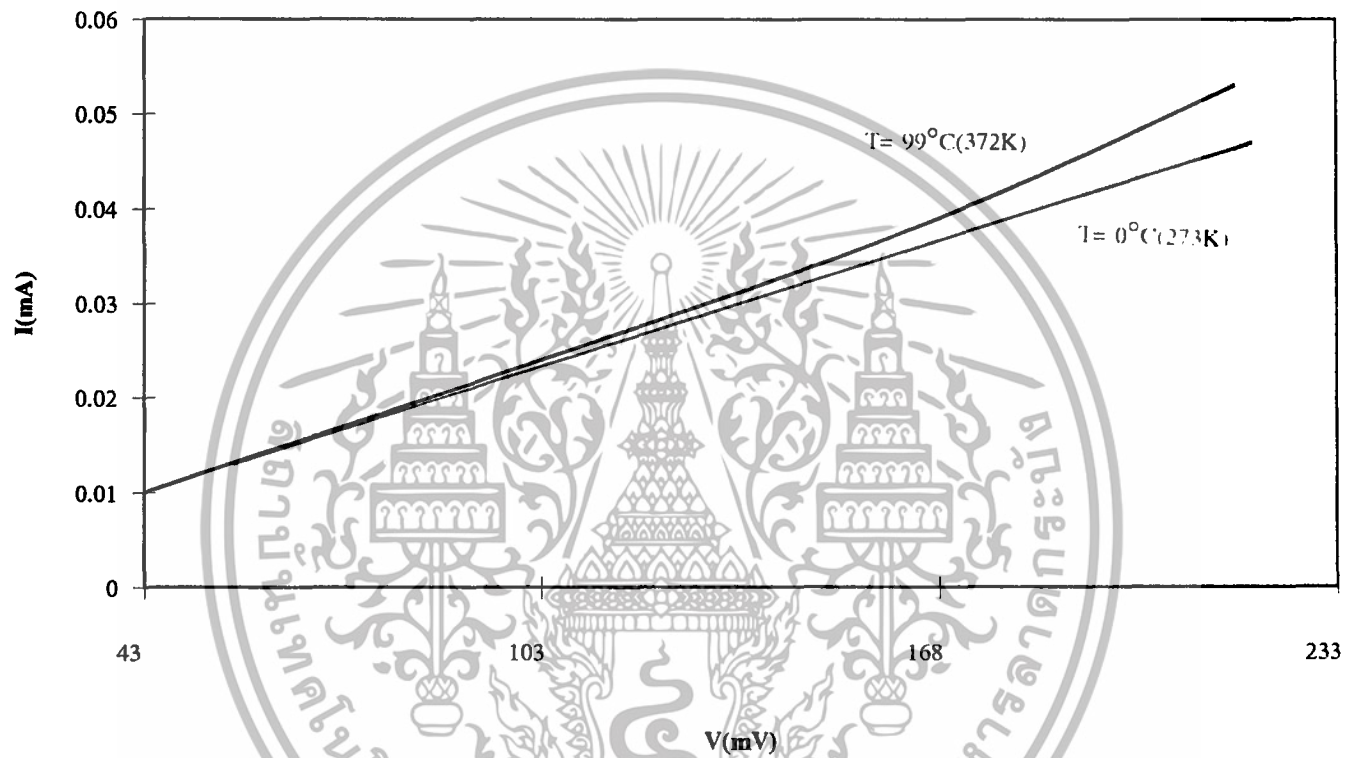
รูปที่ 9.27 แสดงค่ากระแสรั่ว (I<sub>01</sub>) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub>#2 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่างๆ



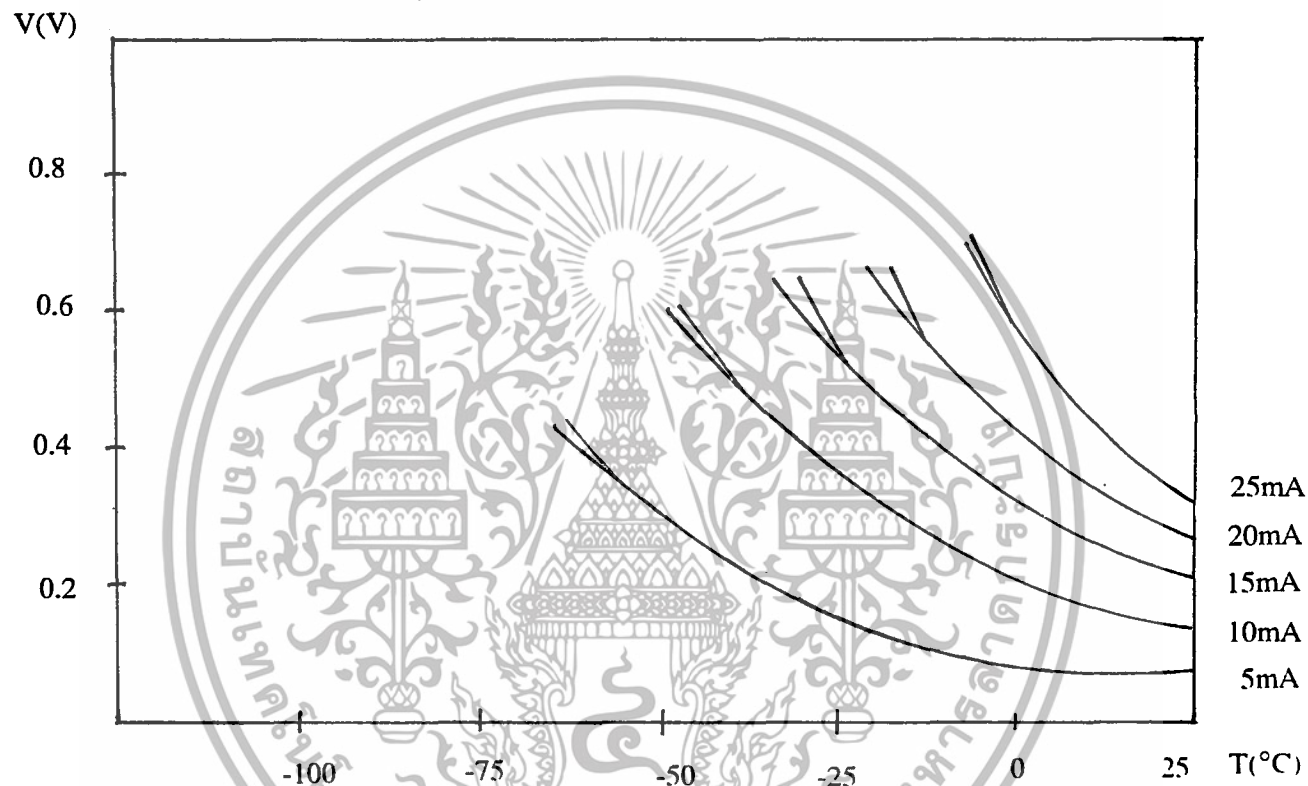
รูปที่ 9.28 แสดงค่ากระแสชาร์ตสัน ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In-Pb ที่อุณหภูมิต่างๆ



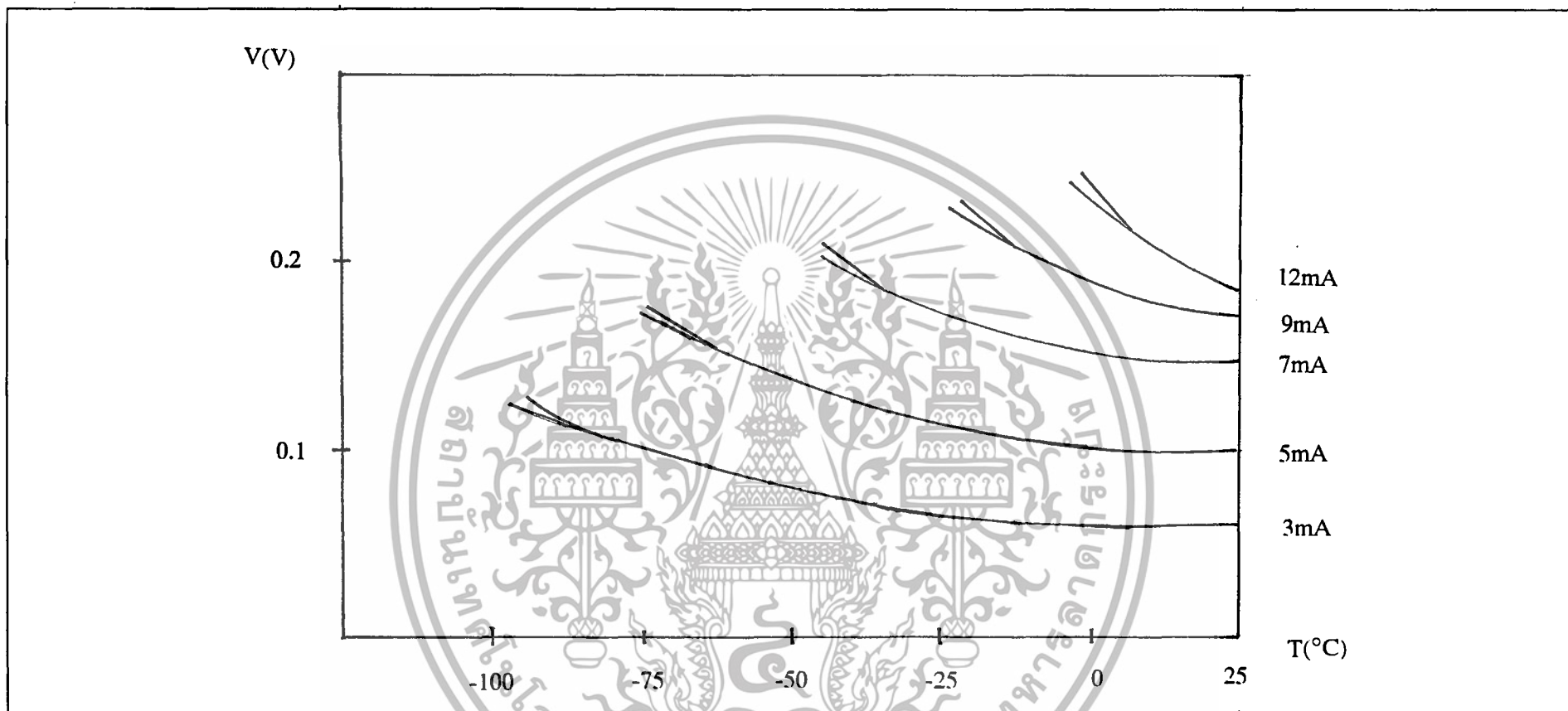
รูปที่ 9.29 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง  $p\text{-CuInSe}_2$  กับ In ที่อุณหภูมิต่างๆ



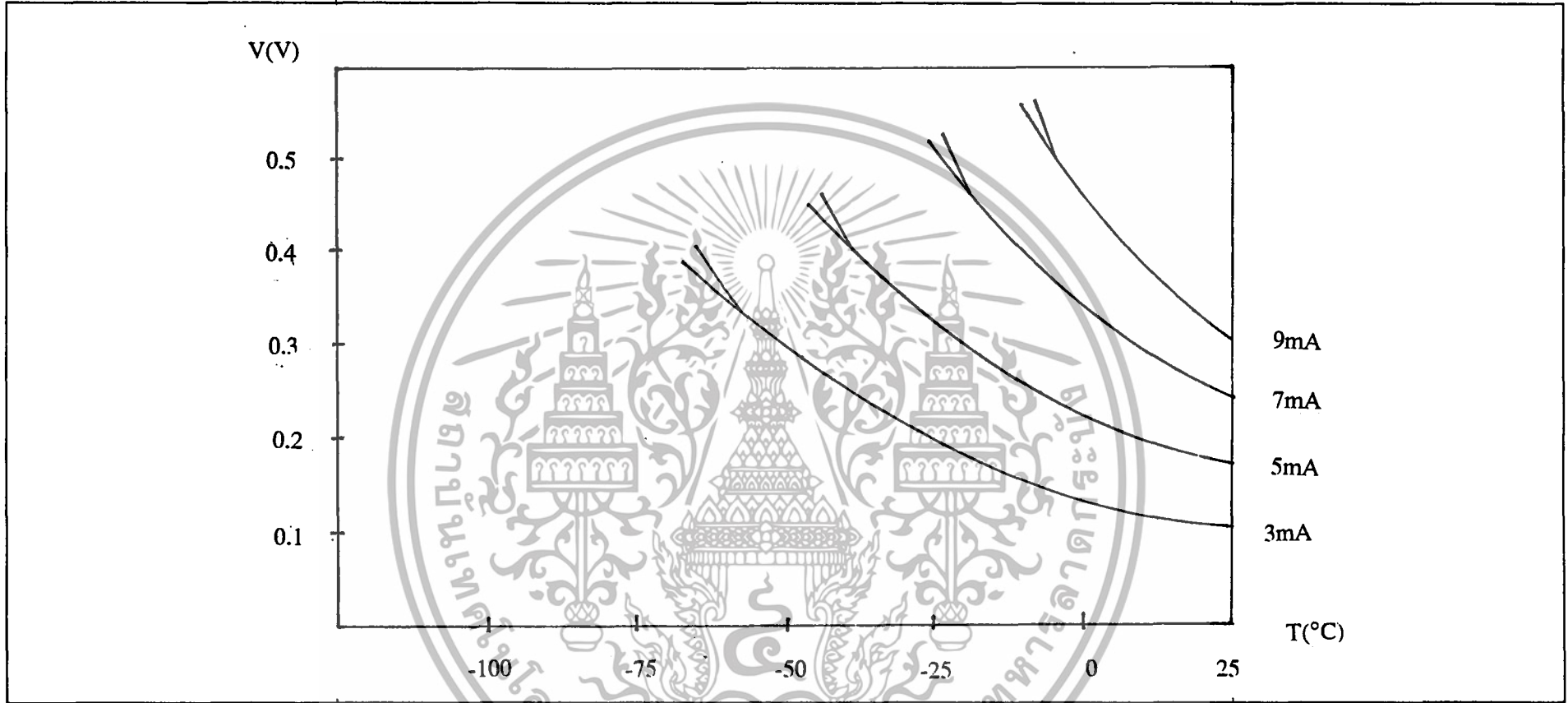
รูปที่ 9.30 แสดงกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง n-CuInSe<sub>2</sub> กับ In ที่อุณหภูมิต่างๆ



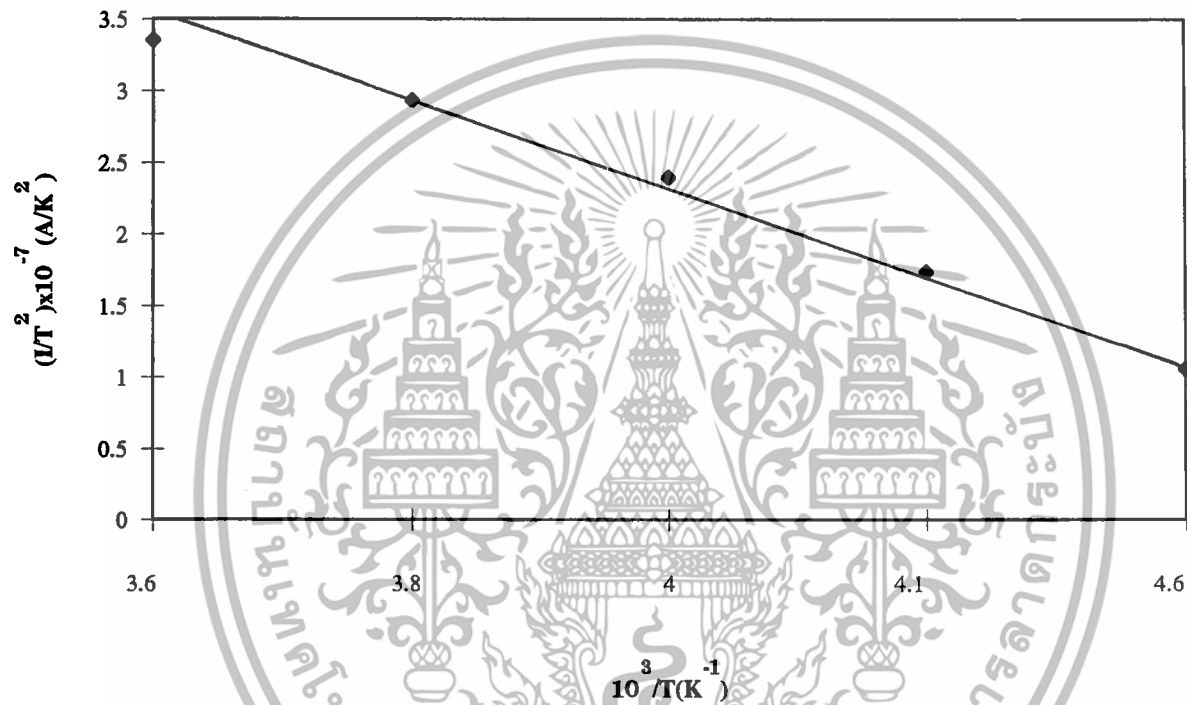
รูปที่ 9.31 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub> #1 กับ In-Pb ที่กระแสสแกนที่ค่าต่างๆ



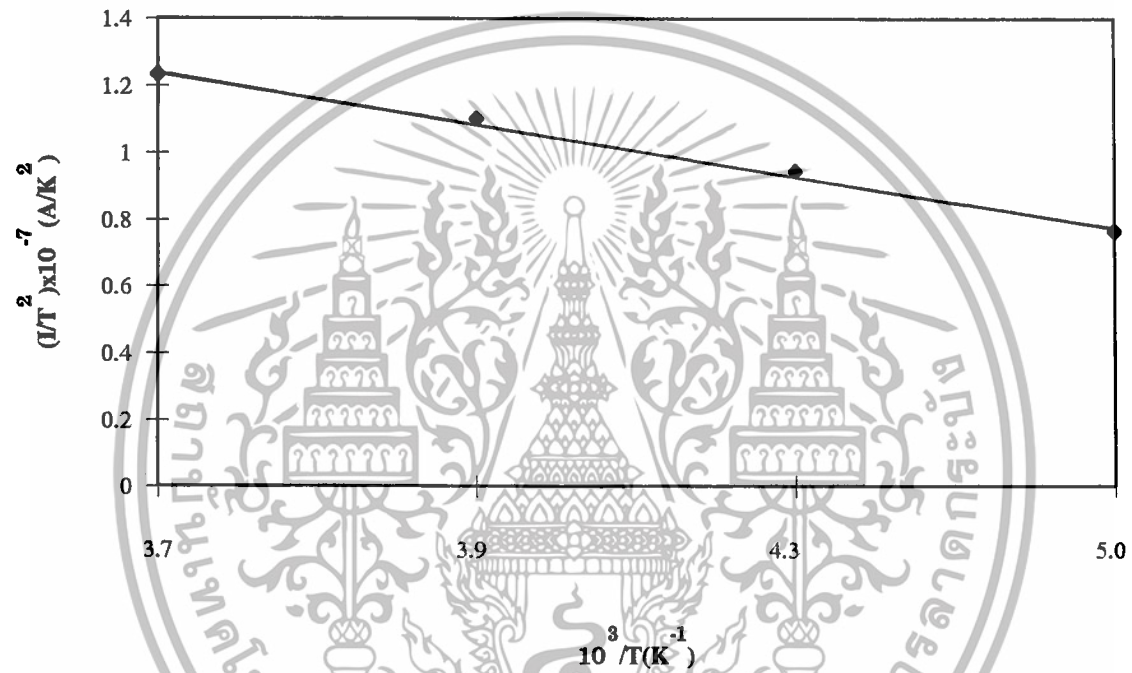
รูปที่ 9.32 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub> #2 กับ In-Pb ที่กระแสคงที่ที่ค่าต่างๆ



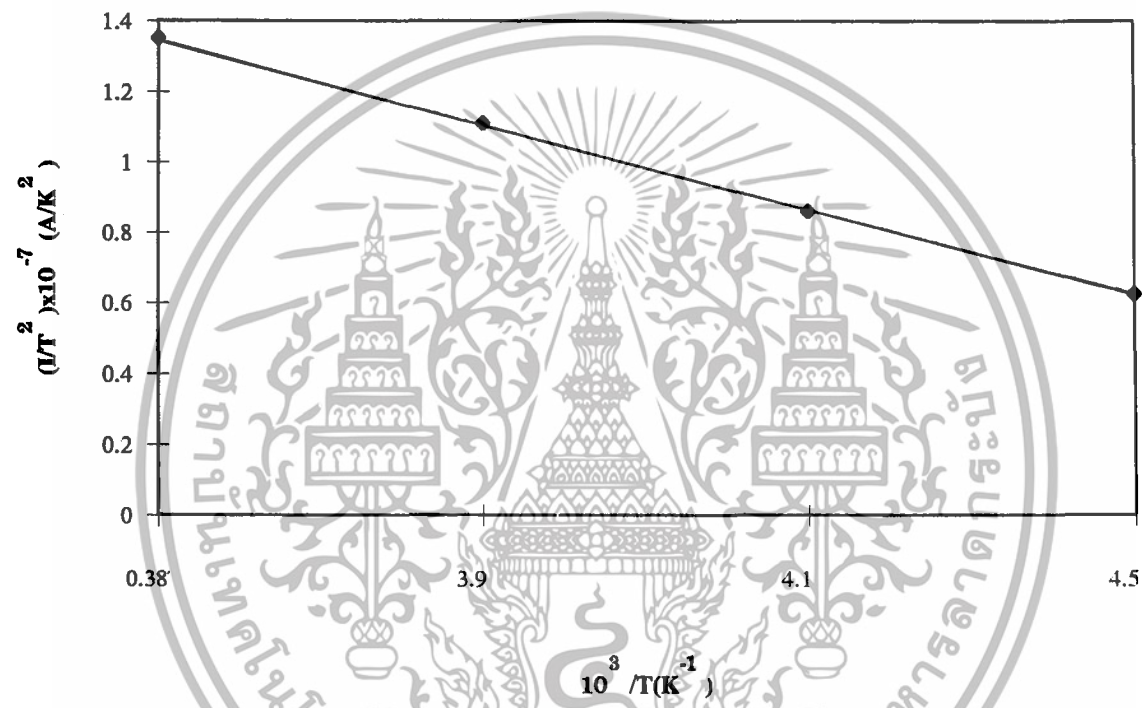
รูปที่ 9.33 แสดงกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์-อุณหภูมิของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe<sub>2</sub> #2 กับ In-Pb ที่กระแสที่ที่ค่าต่างๆ



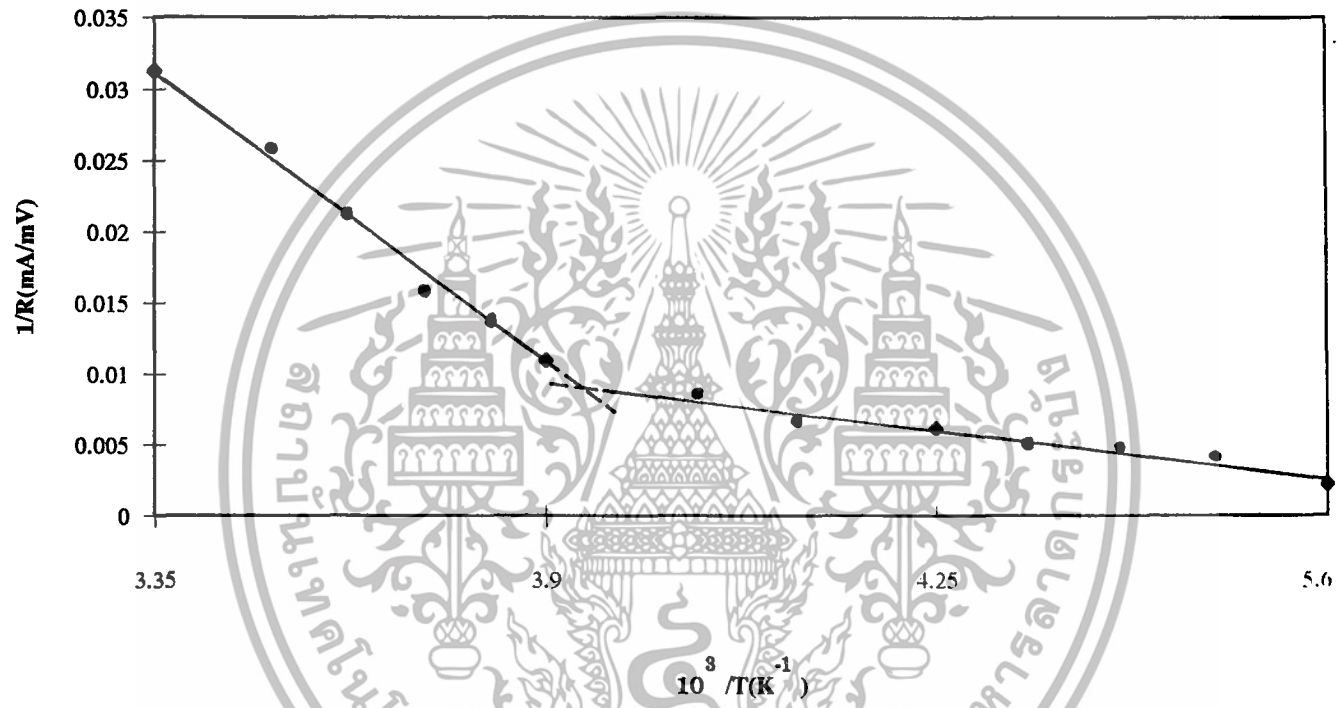
รูปที่ 9.34 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In-Pb



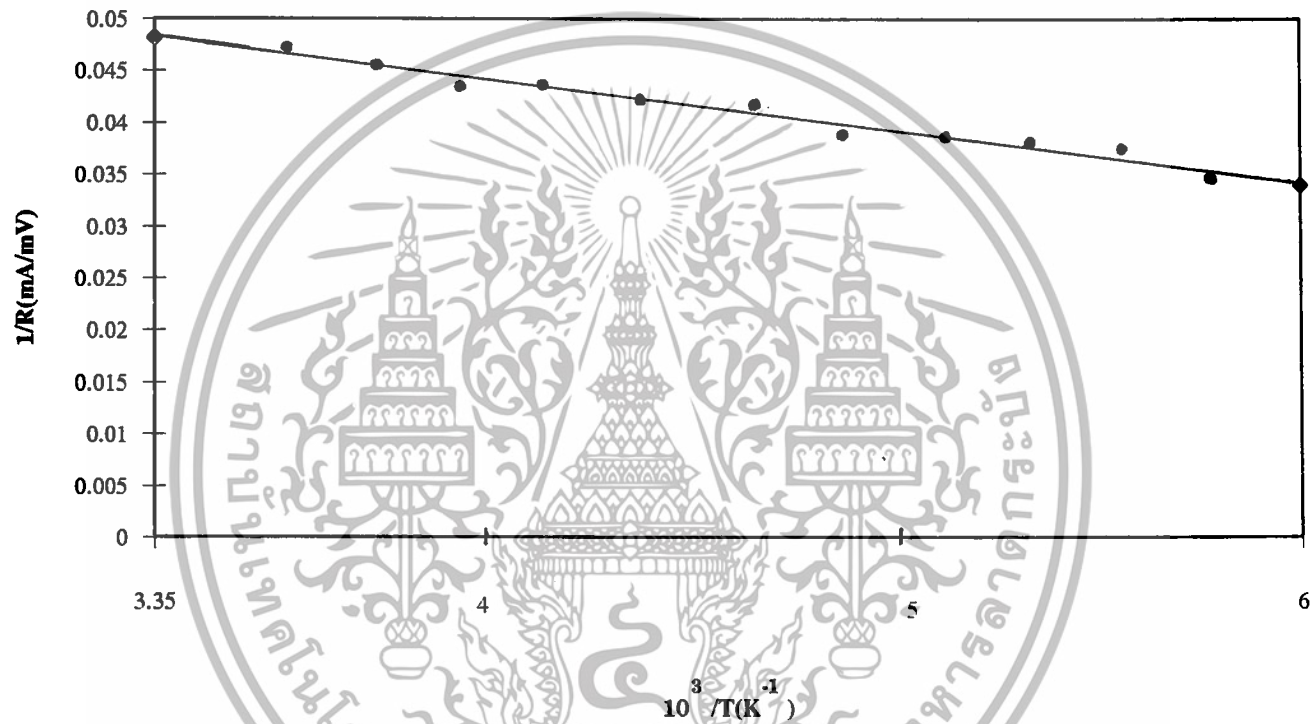
รูปที่ 9.35 แสดงการหาความสูงของกำแพงกั้นของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub>#2 กับ In-Pb



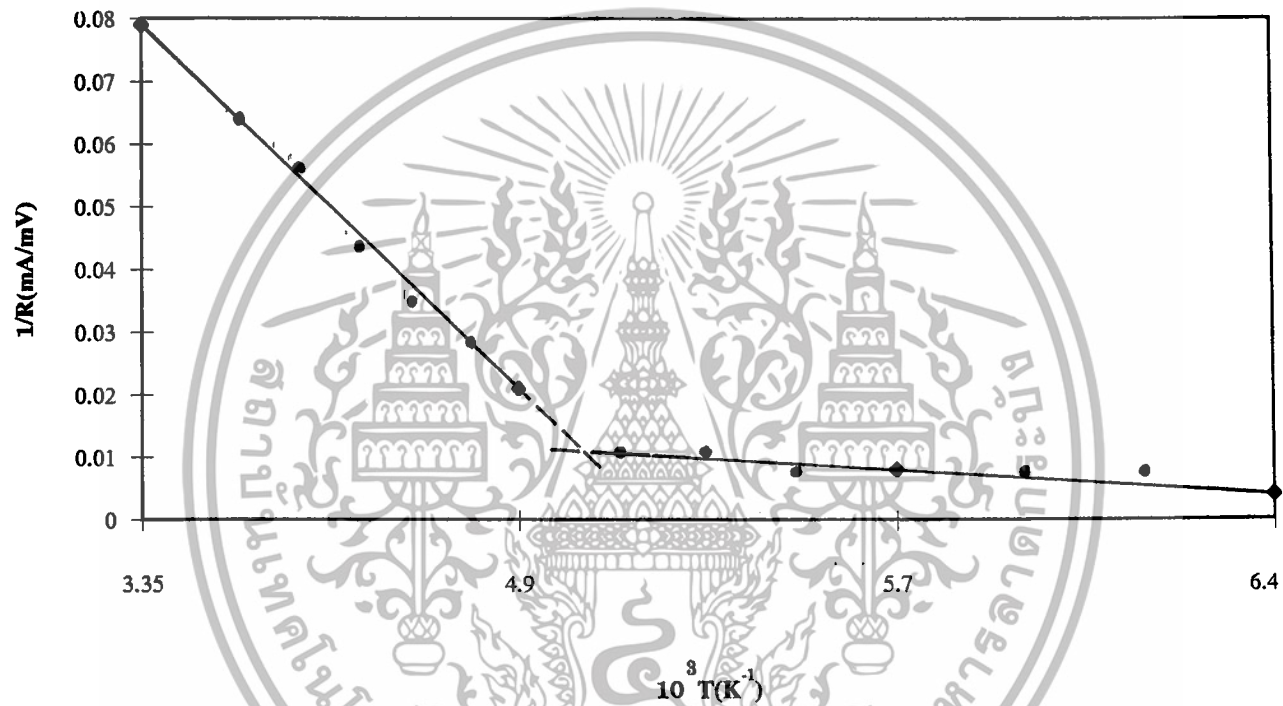
รูปที่ 9.36 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe<sub>2</sub>#1กับ In-Pb



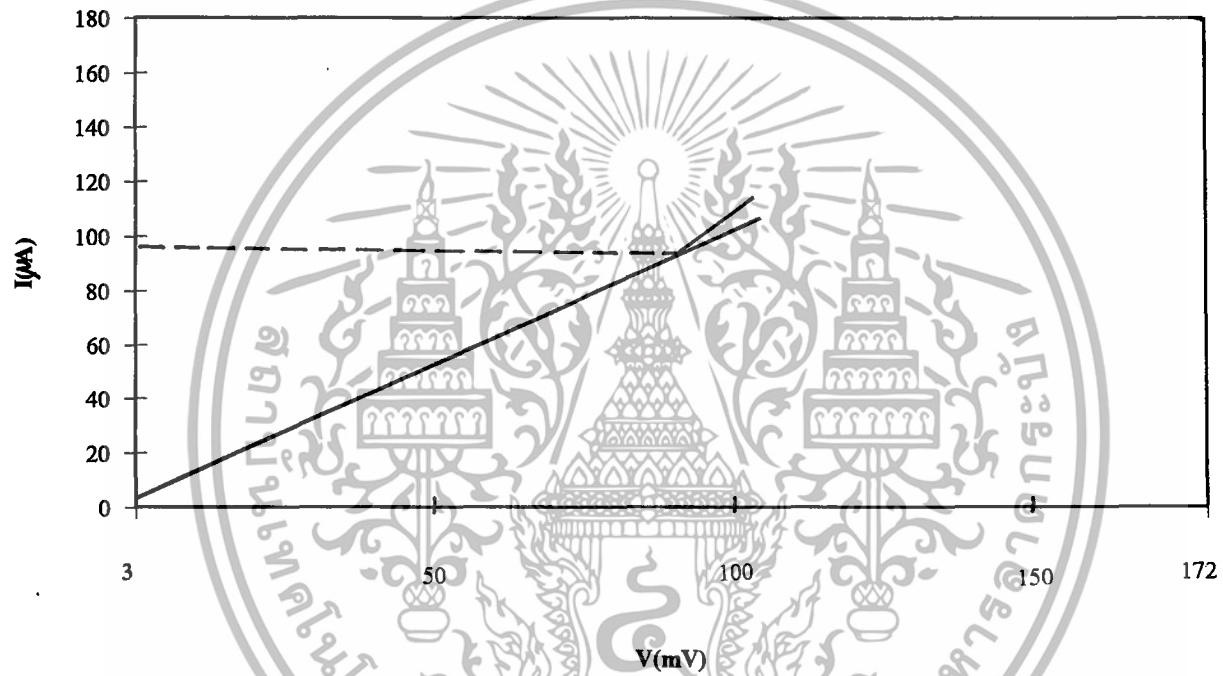
รูปที่ 9.37 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ p-CuInSe<sub>2</sub>#1 จากกราฟระหว่าง ส่วนกลับของความต้านทานของชิ้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



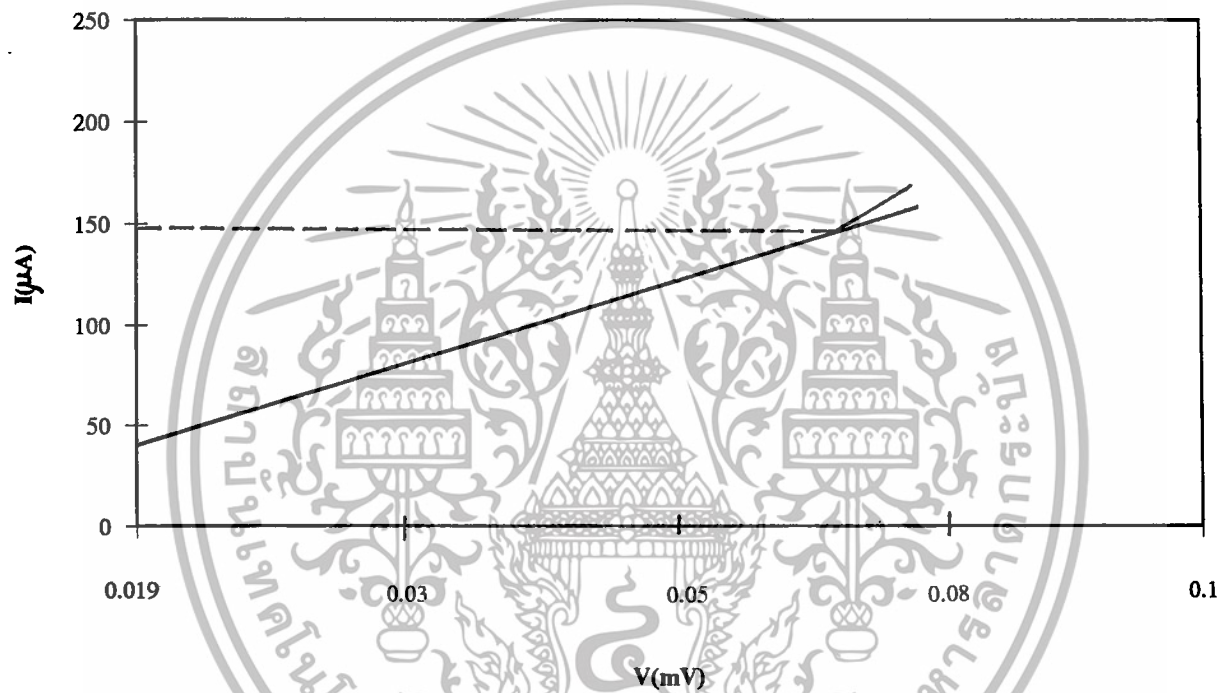
รูปที่ 9.38 แสดงการหาค่าพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานถึงเจ็ปของ p-CuInSe<sub>2</sub>#2 จากกราฟระหว่าง ส่วนกลับของความต้านทานของชิ้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



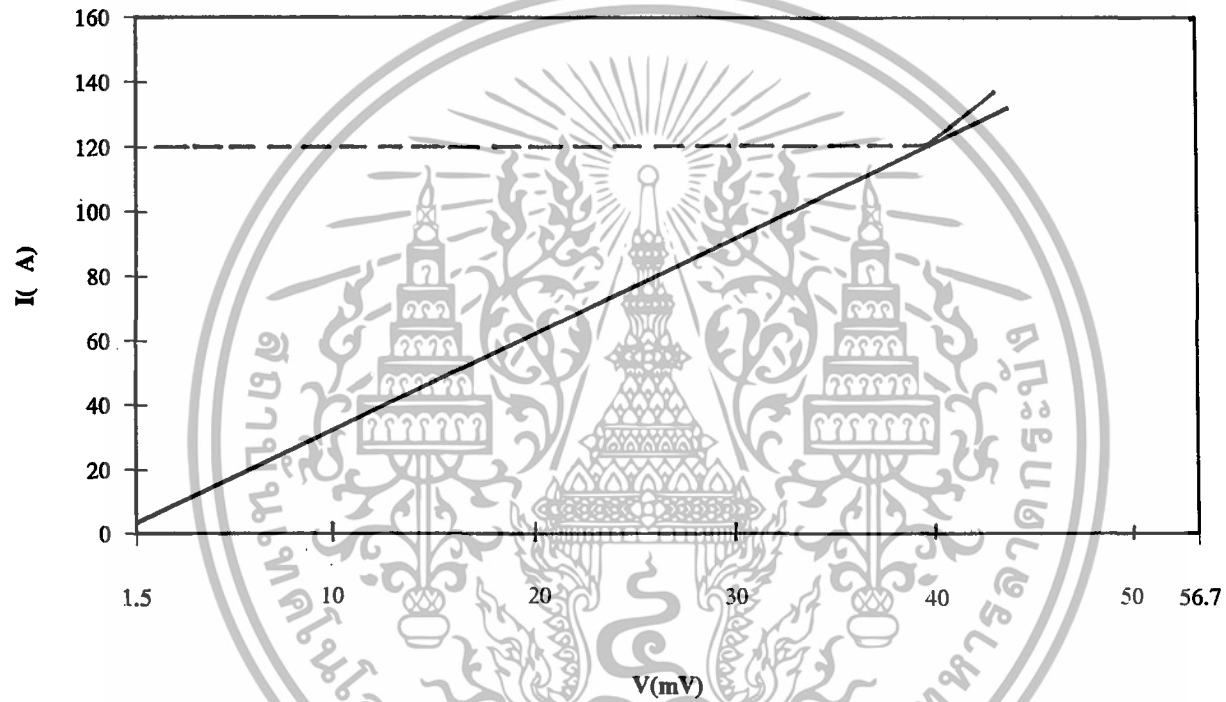
รูปที่ 9.39 แสดงการหาค่าพลังงานไอออนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปนของ n-CuInSe<sub>2</sub>#1 จากกราฟระหว่าง ส่วนกลับของความต้านทานของชั้นสารกับส่วนกลับของอุณหภูมิ



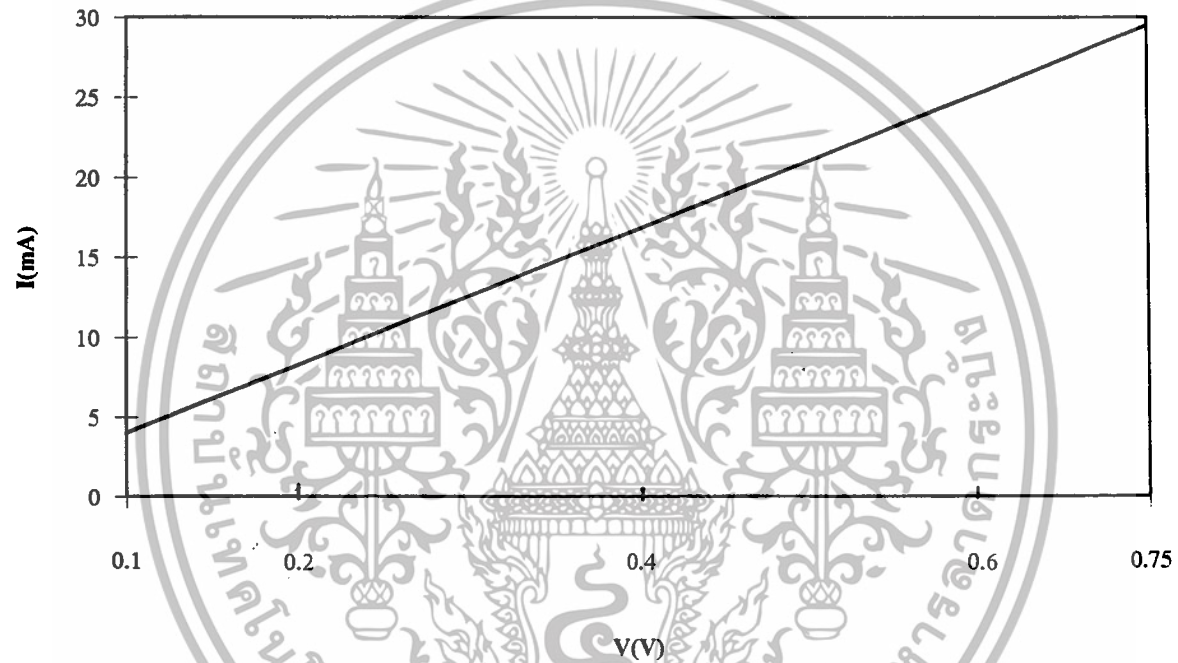
รูปที่ 9.40 แสดงค่ากระแสชาร์ตต้น ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง  $p\text{-CuInSe}_2\#1$  กับ In ที่อุณหภูมิห้อง



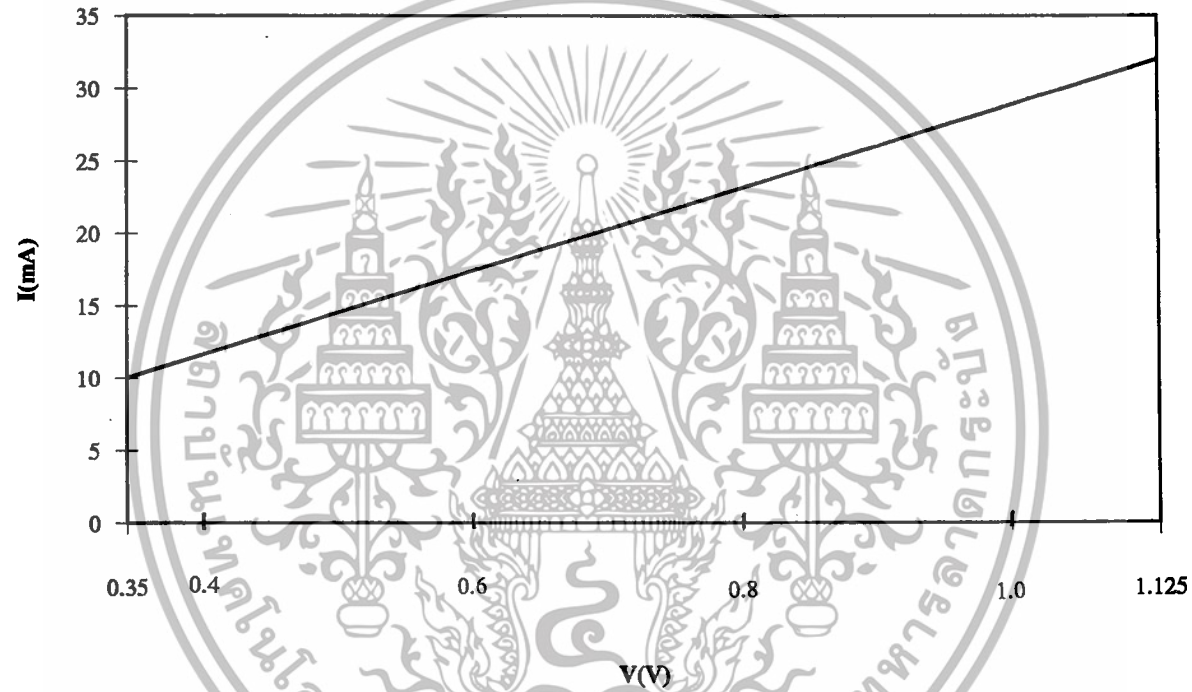
รูปที่ 9.41 แสดงค่ากระแสชาร์ตสัน ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง  $p\text{-CuInSe}_2\#2$  กับ In ที่อุณหภูมิห้อง



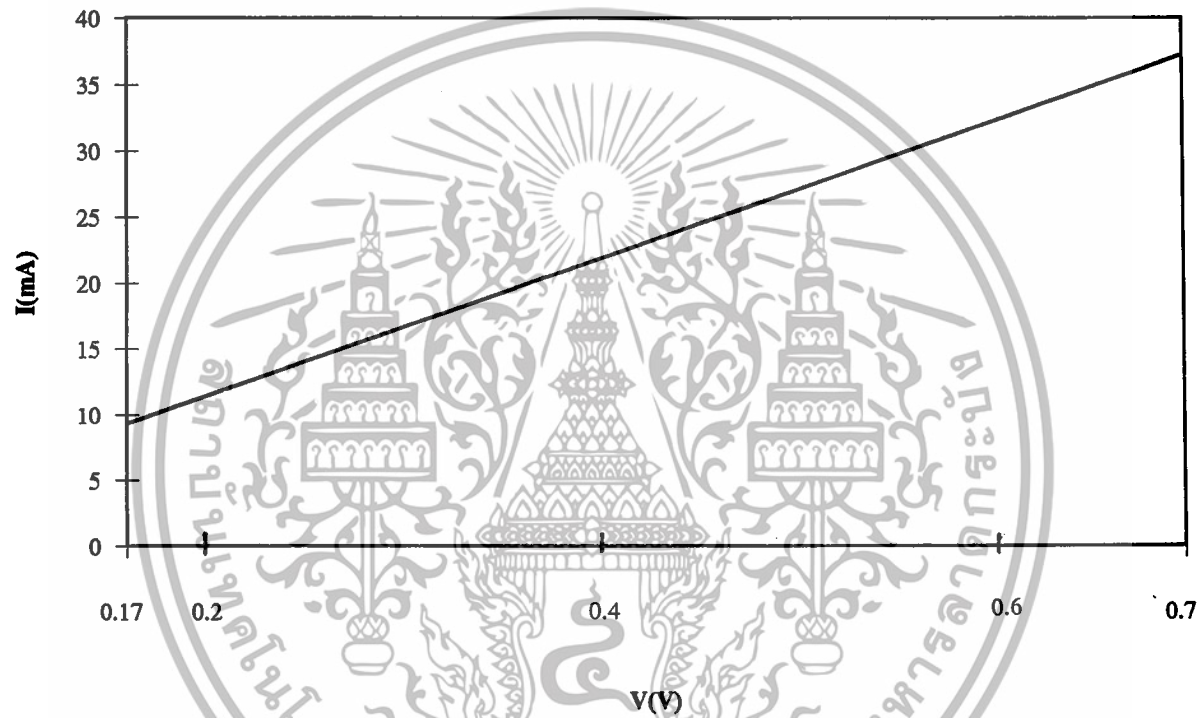
รูปที่ 9.42 แสดงค่ากระแสรั่วเริ่มต้น ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง n-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 9.43 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง p-CuInSe<sub>2</sub>#1 กับ In-Sn-Cd ที่อุณหภูมิ 77K



รูปที่ 9.44 แสดงค่ากระแสรีอาร์ตต้น ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง  $p\text{-CuInSe}_2$  #2 กับ  $\text{In-Sn-Cd}$  ที่อุณหภูมิ 77K



รูปที่ 9.45 แสดงค่ากระแสเริ่มต้น ( $I_{01}$ ) จากกราฟระหว่างค่ากระแส-ความต่างศักย์ของรอยต่อระหว่าง  $n\text{-CuInSe}_2$ #1 กับ  $\text{In-Sn-Cd}$  ที่อุณหภูมิ 77K

## บทที่ 10

### สรุปผลและวิจารณ์

ในการทำโครงการพิเศษนี้มีขั้นตอนคือการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำเพื่อที่จะนำไปศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งผลึกกึ่งตัวนำที่เตรียมได้นี้จะนำไปหาค่าคงที่ของโครงผลึก จากนั้นนำผลึกไปตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และศึกษาสมบัติของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  กับโลหะอินเดียมและโลหะผสมของอินเดียม

การเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  มีจุดประสงค์คือต้องการให้ได้ชิ้นสารมีขนาดใหญ่ ดังนั้นเราเลือกเตรียมสาร โดยตั้งให้เตาเพียง 5 องศา ซึ่งจะเป็นการเพิ่มผิวหน้าเปิดด้านส่วนบนของสารให้มากขึ้น ทั้งยังลดรอยแยกที่เกิดขึ้นในเนื้อสารได้ด้วยเช่นกัน การลดอุณหภูมิเพื่อให้สารจากสภาวะหลอมเหลวแข็งตัวเป็นผลึกโดยวิธีลดอุณหภูมิเตาโดยใช้วงจรไฟฟ้ากึ่งกลศาสตร์จะไม่ทำให้อุณหภูมิที่เตรียมได้แตกต่างในแง่สมบัติทางฟิสิกส์

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าค่าคงที่โครงผลึก  $a$  และ  $c$  มีค่าเท่ากับ 5.789(7)อังสตรอม และ 11.645(6)อังสตรอม ตามลำดับ  $c/a$  จึงมีค่าเท่ากับ 2.01

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าโดยวิธีชี้วัดความร้อนพบว่าตลอดทั้งแท่งสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้จะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นอย่างใดอย่างหนึ่ง สภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้วิธีแวนเดอเพอร์ พบว่าสารที่เตรียมได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1-9.0 โอห์ม-เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไป

ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะ In-Pb กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าเท่ากับ 0.19 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 0.16 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ความหนาแน่นของกระแสที่ใช้ได้จะไม่เกิน 0.14 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง และจะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิลดลง สำหรับรอยต่อระหว่าง In-Sn-Cd กับสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีมากสามารถใช้ได้ในช่วงความหนาแน่นของกระแสสูงกว่า 0.12 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 องศาเคลวิน) ซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมักขึ้น ความสูงของกำแพงศักย์ต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพลังงานไอออไนซ์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  โดยการวัดส่วนกลับของความต้านทาน ( $1/R$ ) ของสารที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้ทราบว่า  $\text{CuInSe}_2$  มีระดับพลังงานสิ่งเจือปนที่เกิดเนื่องจากความบกพร่องของผลึกมีทั้งระดับพลังงานผู้รับ ( $E_a$ ) และผู้ให้ ( $E_d$ ) โดยพลังงานไอออไนซ์ที่หาได้มีค่าเท่ากับ 104 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์สำหรับ  $p\text{-CuInSe}_2\#1$  เท่ากับ 150 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับ  $p\text{-CuInSe}_2\#2$  และเท่ากับ 103 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์, 15 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์สำหรับ  $n\text{-CuInSe}_2\#1$  ตามลำดับ

### ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

จากการศึกษาการเตรียมผลึกกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทำให้ทราบเทคนิคในการเตรียมเพื่อให้ได้สารที่มีขนาดใหญ่พอที่จะนำไปใช้ในการศึกษาต่อไปได้ ตลอดจนทราบถึงแนวทางการหาค่าคงที่ของโครงผลึก เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ การทำรอยต่อแบบโอห์มมิกของ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นที่ใช้งานได้ดีรวมทั้งทำให้ทราบว่า  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้นี้มีสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกอยู่ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ในขั้นต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

การเตรียมสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  โดยวิธีโครเรชันนัลฟริชซึ่งในโครงการนี้ยังไม่สามารถควบคุมการเกิดผลึกเอกพันธ์ที่มีขนาดใหญ่ได้ ในการศึกษาต่อไปเราอาจเลือกใช้หลอดแก้วควอทซ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้ผลึกตามขนาดที่ต้องการ หากเราอาจจะควบคุมชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนของ  $\text{Cu, In}$  และ  $\text{Se}$  ให้ต่างจากสโตยคิโอเมตริเล็กน้อย

ในการศึกษารอยต่อโอห์มมิกต่อไปเราอาจสร้างรอยต่อด้วยวิธีอื่นเช่น การระเหย (evaporation) โลหะบนสารกึ่งตัวนำ และทำการแอนนีลรอยต่อที่หลายๆอุณหภูมิแล้วทำการเปรียบเทียบการทดลอง เพื่อให้ได้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดีที่สุด อีกทั้งควรมีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) เพื่อหาระดับพลังงานสิ่งเจือปนเปรียบเทียบกับที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Bucher, E. "Photovoltaic Power" Physics in Technology, 27 (July 1986): 152-161.
2. Sze, S.M., Semiconductor Device Physics and Technology, Wiley-Interscience, New York, 1985, pp.1-10.
3. จูตินัย แก้วแดง "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียม-ไดซีลีไนด์ (CuInSe<sub>2</sub>)" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530.
4. Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, 5th ed., Wiley & Sons, New Delhi, 1983, p.190.
5. Many, A.; Golstein, Y.; and Grover, N.B., Semiconductor Surfaces, 2nd ed., pp. 19-22, North-Holland Publishing Company, Amsterdam and London, 1971.
6. Shay, J.L. and Wernick, J.H. Ternary Chalcopyrite Semiconductor, Peramon Press, London, 1975, pp. 1-78.
7. Fearheiley, M.L. "The phase relation in the Cu, In, Se system and the growth of CuInSe<sub>2</sub> single crystals" Solar Cells, 16(1986:91-100).
8. Remeo, N.; Canevari, V.; Sberveglieri, G; Bosio, A; and Zanotti, L. "Growth of large-grain CuInSe<sub>2</sub> thin films by flash-evaporation and sputtering" Solar Cells, 16(1986): 155-164.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Tell, B; Shay, J.L.; and Kasper, H.M. "Room temperature Electrical Properties of Ten I-III-VI<sub>2</sub> Semiconductors" J. Appl. Phys. 43, 2496(1972).
10. Shih, I.; Champness, C.H.; and Vahidshahidi, A. "Growth by directional freezing of CuInSe<sub>2</sub> and diffused homojunctions in bulk material" Solar Cells, 16(1986): 27-41.
11. Datta, T.; Noufi, R.; and Dbe, K. "Electrical conductivity of p-type CuInSe<sub>2</sub> thin films" Appl. Phys. Lett. Vol. 47, No. 10, 1985: 1102-1104.
12. Rincon, C.; Bellabarba, C.; Gonzalez, J.; and Sanchezperez, G. "Optical properties and characterization of CuInSe<sub>2</sub>" Solar cells 16(1986): 335-349.
13. Hannay, N.B., SEMICONDUCTORS, Reinhold Publishing Corporation, New York, (1959) pp. 87-140.
14. De Kok, A.J.R., "Crystal Growth of Bulk Crystals : Purification, Doping and Defects" Handbook on semiconductor Vol. 3, North-Holland Publishing Company, 1980, pp. 247-333.
15. Tomlinson, R.D.; "Fabrication of CuInSe<sub>2</sub> single crystals using melt-growth techniques" Solar Cells, 16(1986) : 17-26.
16. Hannay, N.B. SEMICONDUCTOR, Reinhold Publishing Corporation New York, (1959) pp. 87-140.
17. Tomlinson, R.D.; "Fabrication of CuInSe<sub>2</sub> single crystals using melt-growth techniques" Solar Cells, 16(1986): 17-26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. Cullity, B.D. Elements of X-ray Diffraction, 2nd ed., Addison-Wesley, Massachusetts, 1978, pp. 1-176.
19. ธงชัย พันธุ์เมธาฤทธิ์ “ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกและช่องว่างแถบพลังงานของโลหะผสม-กึ่งตัวนำ  $\text{AgGaTe}_{2(1-x)}\text{Se}_{2x}$ ”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2526.
20. Runyan, W.R. Semiconductor Measurements and Instrumentation McGraw-Hill Book Company, New York, 1975: 65-75.
21. Van der Pauw, L.J. “A method of measuring specific resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape” Philips Res. Repts, 13, 1958: 1-9.
22. Sze, S.M. Physical of Semiconductor Devices 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981: 16-32, 245-306.
23. Tantraporn, W. “Determination of low Barrier Heights in Metal-Semiconductor Contacts” JAppl.Phys., Vol. 41, No.11, 1970: 4669-4671.
24. ธรรมศักดิ์ สิงคเสถิต “ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกและช่องว่างของแถบพลังงานของโลหะผสมกึ่งตัวนำ  $\text{AgGa}_y\text{In}_{(1-y)}\text{Ta}_{(1-z)}\text{Se}_{2z}$  เมื่อ  $y=0.2$ ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2526.
25. งามนิตย์ วงษ์เจริญ “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2531.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ตารางแสดงค่า แฟลคเตอร์ค่าแก้มของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเวนเคอเพาว์

$\frac{R_{MN.OP}}{R_{NO.PM}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1										
1	1	0.9992	0.9971	0.9941	0.9903	0.9860	0.9813	0.9763	0.9711	0.9657
2	0.9603	0.9548	0.9493	0.9438	0.9383	0.9329	0.9275	0.9222	0.9196	0.9118
3	0.9067	0.9017	0.8967	0.8919	0.8871	0.8824	0.8779	0.8733	0.8689	0.8646
4	0.8603	0.8561	0.8520	0.8479	0.8440	0.8401	0.8363	0.8325	0.8288	0.8252
5	0.8217	0.8182	0.8147	0.8114	0.8080	0.8048	0.8016	0.7984	0.7953	0.7923
6	0.7893	0.7863	0.7834	0.7806	0.7778	0.7750	0.7723	0.7696	0.7670	0.7644
7	0.7618	0.7593	0.7568	0.7543	0.7519	0.7495	0.7472	0.7449	0.7426	0.7403
8	0.7381	0.7359	0.7338	0.7316	0.7295	0.7275	0.7254	0.7234	0.7214	0.7194
9	0.7175	0.7155	0.7136	0.7118	0.7099	0.7081	0.7063	0.7045	0.7027	0.7010
10										
1	0.6993	0.6830	0.6685	0.6553	0.6433	0.6323	0.6222	0.6129	0.6042	0.5961
2	0.5885	0.5814	0.5748	0.5685	0.5625	0.5569	0.5516	0.5465	0.5416	0.5370
3	0.5326	0.5284	0.5243	0.5204	0.5167	0.5131	0.5096	0.5063	0.5031	0.5000
4	0.4970	0.4941	0.4912	0.4885	0.4859	0.4833	0.4808	0.4784	0.4761	0.4738
5	0.4716	0.4694	0.4673	0.4652	0.4632	0.4613	0.4594	0.4575	0.4557	0.4539
6	0.4522	0.4505	0.4488	0.4472	0.4456	0.4440	0.4425	0.4410	0.4395	0.4381
7	0.4367	0.4353	0.4340	0.4326	0.4313	0.4300	0.4288	0.4275	0.4263	0.4251
8	0.4239	0.4228	0.4216	0.4205	0.4194	0.4183	0.4173	0.4162	0.4152	0.4141
9	0.4131	0.4112	0.4102	0.4093	0.4083	0.4074	0.4065	0.4056	0.4047	
100										
1	0.4039	0.3957	0.3885	0.3821	0.3763	0.3710	0.3662	0.3618	0.3577	0.3539
2	0.3503	0.3470	0.3439	0.3409	0.3382	0.3356	0.3331	0.3307	0.3284	0.3263
3	0.3242	0.3223	0.3204	0.3186	0.3169	0.3152	0.3136	0.3120	0.3105	0.3091
4	0.3077	0.3063	0.3050	0.3038	0.3025	0.3013	0.3002	0.2991	0.2980	0.2969
5	0.2958	0.2948	0.2938	0.2929	0.2919	0.2910	0.2901	0.2893	0.2884	0.2876
6	0.2867	0.2859	0.2852	0.2844	0.2836	0.2829	0.2822	0.2815	0.2808	0.2801
7	0.2794	0.2788	0.2781	0.2775	0.2769	0.2763	0.2757	0.2751	0.2745	0.2739
8	0.2734	0.2728	0.2723	0.2717	0.2712	0.2707	0.2702	0.2697	0.2692	0.2687
9	0.2682	0.2677	0.2673	0.2668	0.2663	0.2659	0.2654	0.2650	0.2646	0.2641

1000 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



23-207

d	2.07	1.13	1.20	3.38	(CuInSe <sub>2</sub> ) <sub>8F</sub> (High pressure form III)						
I/I <sub>1</sub>	100	30	70	50	Copper Indium Selenide						
Rad. CuKa λ	1.5418	Filter		Dia.		d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl	d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl
Cut off	I/I <sub>1</sub> Visual					3.38	50	111			
Ref. Range et al., Z. Naturforsch., 23a 1262 (1968)						2.074	100	230			
						1.784	50	311			
						1.461	55	400			
Sys. Cubic		S.G.				1.346	50	331			
a <sub>0</sub> 5.36	b <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	A	C		1.195	70	422			
α	β	γ	Z (2)	Dx 5.35		1.126	80	511,333			
Ref. Ibid.											
cc.	D	aωβ	αp	αy	Color	Sign					
2V											
Ref.											
Zincblende structure, formed from high pressure modification CuInSe <sub>2</sub> II at 1K bar, 25°C.											

23-208

d	1.98	1.07	1.14	3.22	(CuInSe <sub>2</sub> ) <sub>8F</sub> (High pressure form II)						
I/I <sub>1</sub>	100	75	60	50	Copper Indium Selenide						
Rad. CuKa λ	1.5418	Filter		Dia.		d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl	d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl
Cut off	I/I <sub>1</sub> Visual					3.22	50	111			
Ref. Range et al., Z. Naturforsch., 23a 1262 (1968)						1.376	100	230			
						1.462	45	311			
						1.394	45	400			
Sys. Cubic		S.G.				1.279	25	331			
a <sub>0</sub> 5.53	b <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	A	C		1.140	60	422			
α	β	γ	Z (2)	Dx 6.42		1.074	75	511,333			
Ref. Ibid.											
cc.	D	aωβ	αp	αy	Color	Sign					
2V											
Ref.											
Zincblende structure, formed at approx. 40K bar, 400°C.											

23-209

d	2.04	1.74	3.34	5.20	(CuInSe <sub>2</sub> ) <sub>16U</sub> ★						
I/I <sub>1</sub>	100	85	70	6	Copper Indium Selenide						
Rad. CuKa λ	1.5418	Filter Ni	Dia.	114.6mm		d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl	d.A	I/I <sub>1</sub>	hkl
Cut off	I/I <sub>1</sub> Microdensitometer					5.20	6	101	0.97771	30	516,532
Ref. Parkes et al., Dept. of Electrical Engineering, University of Salford, England						3.34	70	112	.34821	2	457,507
						3.20	6	135	.3120	15	6212
						2.52	15	221	.3140	30	620,564
Sys. Tetragonal		S.G.	142d (122)			2.15	6	105,213	.8821	20	3212
a <sub>0</sub> 5.732±0.001	b <sub>0</sub>	c <sub>0</sub>	11.621±0.001	C 2.910		2.04	100	204,220	.8609	6	509,439
α	β	γ	Z (4)	Dx (5.75)		1.900	4	201	.8415	10	645,633
Ref. Ibid.						1.743	45	116,312	.8357	15	448
						1.490	6	305,323	.8256	6	529
						1.446	25	400	.8134	8	5114
cc.	D	aωβ	αp	αy	Color	Sign					
2V											
Ref.											
Semi-conducting compound. Prepared from a stoichiometric mixture of the elements (99.9998 & Cu, 99.9999 & In and 99.9994 & Se); mixture sealed under vacuum in a quartz capsule, melted, powdered and annealed at 790°C.											
						1.200	2	415			
						1.181	60	424			
						1.151	5	501,431			
						1.114	25	336,512			
						1.070	8	417,521			
						1.035	4	505,435			
						1.025	20	048			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาว อัมพวรรณ บัวบุตร เกิดเมื่อวันที่ 16 เดือน ตุลาคม พุทธศักราช 2519 ที่ กรุงเทพมหานคร โดยสำเร็จการศึกษาในระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนศรีอยุธยา และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้