



รายงานผลการวิจัย
เงินทุนวิจัยระดับชาติเกษตรกรรมโลก

เรื่อง

การศึกษาปรากฏการณ์ไฮดรอลิกของธารน้ำแข็งน้ำอะลอย
และเทอนารีที่มีรูปร่างไม่แน่นอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดย

กวีวัฒน์ รัตนธรรมวัฒน์

537.622
ท682 ก
พ.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

เรื่อง



การศึกษาปรากฏการณ์ซอลลของสารกึ่งตัวนำอะลอย
และเทอร์นารีที่มีรูปร่างไม่แน่นอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดย

กิริวัฒน์ รัตนธรรมพันธ์

และ

อนันต์สิน เตชะกำพุช

ตุลาคม 2527

ฝ่ายวิจัย จพว. ๑

มอบให้ศาสตราจารย์ ดร. สกล วัฒนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๑๑ / ก.ย.

๒๕



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

597. 622

ก 6827

๒.1

- 4 ส.ค. 2529

๗ 031669

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะสำเร็จสมบูรณ์ลงไม่ได้ ถ้าไม่ได้รับการสนับสนุนจากเงินวิจัย
รัชดาภิเษกสมโภช จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

กิริวัฒน์ รัตนธรรมพันธ์

อนันตสิน เตชะกำพูน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการวิจัย การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอะลอย และเทอนาไรที่มีรูปร่างไม่
แน่นอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ชื่อผู้วิจัย กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ และ อนันตสิน เตชะกำพุช

เดือนและปีที่ทำการวิจัยสำเร็จ มิถุนายน 2527

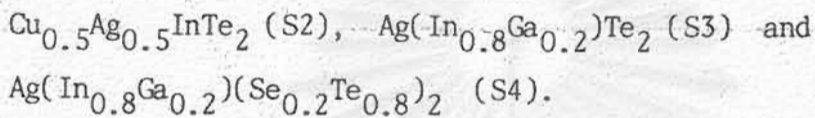
บทคัดย่อ

ในการวิจัยได้เตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำแบบซาลโคไฟไรท์โดยใช้เทคนิคของ
Vertical Bridgman ในการเตรียมโคสลดอุณหภูมิโดยวิธีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเข้าไป
ในวงจร Thermocouple โดยให้อุณหภูมิลดลงในอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อวัน
ผลึกที่เตรียมและสามารถนำไปศึกษาปรากฏการณ์ขนส่งได้มี $\text{Cu}_{0.5}\text{Ag}_{0.5}\text{InTe}_2$ (S2)
 $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Te}_2$ (S3) และ $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_2$ (S4)

โดยอาศัยวัสดุส่วนใหญ่ที่ได้ในประเทศ ได้สร้างเครื่องมือพร้อมทั้งอุปกรณ์ควบคุม
อุณหภูมิซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 77 K ถึง 473 K โดยมีความเที่ยงตรง
ประมาณ ± 0.2 K และใช้เครื่องมือนี้ศึกษาปรากฏการณ์ขนส่งทางไฟฟ้าของผลึกที่เตรียมได้
โดยวิธีการของ แวน เคอ พาว พบว่าผลึกทั้งสามมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) อยู่ในช่วงของ
สารกึ่งตัวนำ สำหรับผลึก S2 และ S3 การเปลี่ยนแปลงของ ρ ในช่วง 30°C ถึง
 80°C น้อยมาก กล่าวคือจาก 0.55 ถึง 0.64 ohm-cm และจาก 66.7 ถึง
41.2 ohm-cm จากการวัดสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) ของผลึก S3 พบว่าความหนาแน่น
ของพาหะ (n) เกือบไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมินี้ จึงสรุปว่ากระบวนการนำไฟฟ้าของ
ผลึก S2 และ S3 ถูกควบคุมด้วยพาหะซึ่งมาจากสารแปลกปลอมและความไม่สมบูรณ์ของ
โครงสร้างผลึก แต่สำหรับผลึก S4 การเปลี่ยนแปลงของ ρ ในช่วงอุณหภูมินี้ค่อนข้างมาก
คือจาก 4.77×10^5 ถึง 0.475×10^5 ohm-cm ซึ่งคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของ
 ρ ของผลึกกึ่งตัวนำแท้ซึ่งมี $E_g \approx 1$ eV จึงคาดว่าในจำนวนผลึกทั้งสาม S4 มี
โครงสร้างที่มีความบกพร่องน้อยที่สุด ซึ่งสมควรจะศึกษาโดยละเอียดต่อไป

Abstract

In this studying, charlcopyrite semiconductor crystals were grown by using vertical Bridgman technique. A variable dc. source was inserted into the thermocouple circuit. By gradual raising the dv-voltage as predesigned, a cooling rate of 20°C per day was obtained. The prepared crystals which can be studied are



The equipment with temperature control unit was constructed by using mostly local material. This equipment can work in the temperature range of 77 K to 473 K with ± 0.2 K accuracy. The Van de Pauw technique was used to study the electrical transport phenomena of the crystals. It has been found that the resistivity (ρ) of these crystal is in the range of the resistivity of semiconductor. For S2 and S3 the change in ρ between 30°C to 80°C is small: from 0.55 to 0.64 ohm-cm and from 66.7 to 41.2 ohm-cm. respectively. The measurement of Hall coefficient (R_H) of S3 shows that the carrier concentration (n) is almost constant in this interval of temperature. These indicate that the conductivity process is dominated by carriers from impurities and lattice defects. For sample S4 the change in ρ in this temperature range is high: from 4.77×10^5 to 0.475×10^5 ohm-cm, which is similar to the change in ρ of $E_g \approx 1$ eV intrinsic semiconductor. Thus among these three crystals, S4 has least structural defect and therefore is worth for further investication.

สารบัญ

กิติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vii
รายการภาพประกอบ	viii
บทนำ	1
บทที่ 1 วิธีของแวนเคอพาว	3
1.1 วัตถุประสงค์ของตรงขนาดกว้างมาก	3
1.2 การส่งแบบคอนฟอร์ม	7
1.3 ทฤษฎีของแวนเคอพาวสำหรับผลึกแบนรูปต่าง ๆ	14
บทที่ 2 การเตรียมสารกึ่งตัวนำซัลโคไฟไรท์	19
2.1 การชั่งธาตุต่าง ๆ เพื่อมาหลอมรวมกัน	19
2.2 การปลูกผลึกเดี่ยว	20
2.3 การตัดและการขัดผิวผลึก	26
บทที่ 3 เครื่องมือทดลอง	28
3.1 หีบบรรจุผลึกซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้	28
3.2 เครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ	29
3.3 แผ่นยึดผลึก	34

บทที่ 4	ผลการทดลอง	37
4.1	การทดลองของผลึก S 1	38
4.2	การทดลองของผลึก S 2	42
4.3	การทดลองของผลึก S 3	56
4.4	การทดลองของผลึก S 4	63
4.5	การทดลองที่อุณหภูมิค่า	68
4.6	ผลลัพธ์เชิงทฤษฎีจากการทดลอง	70
4.7	ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม		74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

ตาราง	หน้า
4.1 ค่า R_{ij} ของผลึก S1	38
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{34} และ V_{12} ของผลึก S1	39
4.3 R_{ij} ของผลึก S2 ในหน่วยกิโลโอห์ม	43
4.4 ผลการทดลองวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C	44
4.5 ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 39°C	49
4.6 ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 56°C	51
4.7 ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 78°C	53
4.8 $R_{ab,cd}$ ต่างๆ และค่า ρ ของผลึก S2 ที่คำนวณได้	55
4.9 R_{ij} ของผลึก S3 ในหน่วยกิโลโอห์ม	57
4.10 การวัด ρ ของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 30°C	57
4.11 ผลการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 39°C, 61°C และ 81°C	60
4.12 ค่า $R_{ab,cd}$ ต่างๆ และ ρ ของผลึก S3 ที่คำนวณได้	61
4.13 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของผลึก S3	63
4.14 การวัด $R_{34,12}$ ของผลึก S4 ที่อุณหภูมิ 30°C	64
4.15 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก S4 ที่อุณหภูมิต่างๆ	66
4.16 ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของผลึก S4	67
4.17 เที่ยบการเปลี่ยนแปลงของ ρ ของตัวอย่างผลึกกึ่งตัวนำแบบ intrinsic	71

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	วัตถุเนื้อเคียวหนาสม่ำเสมอบรรจุเต็มระนาบครึ่งบน	4
1.2	ศักย์ไฟฟ้าที่ขอบล่างของระนาบเมื่อมี P และ Q เป็น current source และ current sink	5
1.3	การส่งเส้นต่าง ๆ ในระนาบ z ไปยังระนาบ w โดยฟังก์ชัน $z = w^{1/2}$	9
1.4	กระแสไฟฟ้าซึ่งผ่านจุด 1, 2 จากซ้ายไปขวา	11
1.5	การส่งผลึกขอบตรงในระนาบ z ไปเป็นผลึกโค้งในระนาบ w	14
1.6	ผลึกที่มีเส้นรอบรูปยาวมาก	17
2.1	แสดงเตาที่ใช้หลอมสาร	21
2.2	แสดงเตาและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	23
2.3	แสดงอุณหภูมิของเตา	23
2.4	แสดงถึงเตาและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ	24
2.5	แสดง temperature profile ของเตา แผนภาพเตาที่ใช้ปลูกผลึก	25
2.6	ผลึกที่ได้จากการปลูกผลึก เกล็ดที่แสดงเป็น ชม.	25
2.7	แสดงอุปกรณ์สำหรับขัดสาร	27
3.1	ทอบรรจุผลึกซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้	28
3.2	วงจรของเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ	31
3.3	วงจรจ่ายกระแสให้ความร้อน	32
3.4	ตัวอย่างแผ่นยัดผลึก	34
3.5	วิธีทำสัมผัสทางไฟฟ้าที่คืออีกแบบหนึ่ง	35
4.1	การทดลองวัดค่า ρ ของผลึก S1	38
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง I ของ V ของผลึก S1	40
4.3	P-N junction	41
4.4	การวัดความต่างศักย์ที่จุดสองจุดของผลึก	41

4.5	แสดง schottky barrier ภายในผลึก	42
4.6	ผลึก S2 และขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ	42
4.7	การวัด $R_{12,34}$, $R_{34,12}$, $R_{41,23}$ และ $R_{23,41}$ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C	45
4.8	กระแสผ่านเข้าผลึกทางขั้วที่ตรงข้ามกัน	48
4.9	การวัด ρ ของผลึก S2 ที่ 39°C	50
4.10	การวัด ρ ของผลึก S2 ที่ 56°C	52
4.11	การวัด ρ ของผลึก S2 ที่ 78°C	54
4.12	ผลึก S3 และจุดสัมผัสทางไฟฟ้าทั้งสี่	56
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง V และ I ต่าง ๆ ในการวัด ρ ของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 30°C	58
4.14	การทดลองวัด R_H	62
4.15	การวัด $R_{34,12}$ ที่อุณหภูมิ 30°C ของผลึก S4	65
4.16	การวัด R_H ของผลึก	67
4.17	การบรรจุท่อทองเหลืองค้ำในด้วยก๊าซไนโตรเจนแห้ง	69



บทนำ

สารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปมีประโยชน์ในด้านการทำชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องมือสื่อสาร เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องมือทางการทหาร เครื่องอำนวยความสะดวกและให้ความบันเทิง เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ วิทยุ เป็นต้น เซลแสงอาทิตย์ก็เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้แปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังมุ่งความสนใจที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งนับวันจะหมดไป แต่เซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ Si หรือ GaAs ยังมีประสิทธิภาพต่ำในการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะโดยธรรมชาติโครงสร้างของสารทำให้สารมี energy gap ที่แน่นอน energy gap นี้เหมาะสมสำหรับบางส่วนของสเปกตรัมของแสงเท่านั้น จึงไม่สามารถดูดกลืนพลังงานแสงส่วนใหญ่เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามค้นหาสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับในงานนี้มากขึ้น

สารประกอบอะลอยและเทอร์นารี (alloy and ternary) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เป็นความหวังใหม่สำหรับนักวิทยาศาสตร์ในขณะนี้ โดยเฉพาะสารพวก I-III-VI₂ และ II-IV-V₂ เนื่องด้วยโครงสร้างและ energy gap ของสารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเข้มข้นของธาตุแต่ละตัวที่จะใช้สังเคราะห์เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ ๆ และหลังจากสังเคราะห์สารเหล่านี้ขึ้นมาได้ เราจำเป็นต้องศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารโดยละเอียดเพื่อประโยชน์ในการใช้งานต่อไป

การวิจัยนับเป็นโครงการเริ่มต้นที่จะศึกษาเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอะลอยและเทอร์นารีแบบนี้ เช่นวัดสภาพนำไฟฟ้า สมบัติของฮอลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้เราทราบกระบวนการนำไฟฟ้าของสารได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคธรรมดาทั่ว ๆ ไปที่ใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสารแบบนี้ได้ เพราะสาเหตุดังต่อไปนี้

(ก) ไม่สามารถเตรียมสารรูปร่างแน่นอน (เช่นเป็นรูปเหลี่ยม) เหมือนพวกสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ได้ อย่างมากทำได้แค่เป็นผลึกที่มีความหนาที่แต่มีรูปร่างไม่แน่นอนเท่านั้น

(ข) สารที่ทำขึ้นได้เปราะมาก ต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการทดลอง

(ค) ทำจุดสัมผัสทางไฟฟ้าที่ทำได้ลำบาก

ดังนั้นจึงต้องหาเทคนิคแบบใหม่ ๆ ขึ้นเพื่อศึกษาสมบัติของสารที่เตรียมขึ้น

ในการวิจัยได้เตรียมงานเป็นขั้นตอนดังนี้

(1) การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกรูปร่างแบนใน (ก) อาจทำได้โดยวิธีของ แวน เดอ พาว (L.J. Van der PAUW) ดังนั้นในขั้นแรกเราจะศึกษาเทคนิคของวิธีการนี้ทั้งในแง่ทฤษฎีและปฏิบัติ

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

ตัดสารให้บาง นำมาขัดผิวให้เรียบขนานกัน ศึกษาวิธีการ etch-ผิวและการทำจุดสัมผัสทางไฟฟ้า จากนั้นทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องแบบง่าย ๆ เพื่อดูถึงความเป็นไปได้ของการทดลองต่อไป

(3) จัดอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง ออกแบบห้องควบคุมอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ที่จะใส่สาร ออกแบบหน่วยให้ความร้อน ศึกษาการนำ การพา และการแผ่รังสีของระบบ ออกแบบ heat shielding ของระบบ ศึกษาการวัดอุณหภูมิของ thermocouple และ Platinum resistor (PR) ทำการ calibrate สำหรับ PR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ศึกษาความเที่ยงตรงของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกายในห้องควบคุมอุณหภูมิ

สร้างเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง $\pm 0.2 \text{ K}$

(4) นำเครื่องมือนี้มาศึกษา electrical transport phenomena ของ ternary and alloy semiconductors ที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากผลที่ได้จะทำการวิเคราะห์ถึง

(ก) การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพาหะตัวนำไปกับอุณหภูมิ

(ข) ศึกษาช่วง intrinsic และ extrinsic ของสาร

(ค) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ mobility ไปกับอุณหภูมิ และอื่น ๆ เท่าที่ทำได้

วิธีของแวนเคอเพาว์¹

เนื่องจากวิธีวัดสภาพทางไฟฟ้าของแวนเคอเพาว์สามารถใช้ได้กับสารที่มีความหนาแน่นที่
แต่มีรูปร่างของหน้าตัดที่ไม่แน่นอน เหมาะสมกับสารตัวอย่างที่จะใช้ในการวิจัยนี้ เราจึงเริ่มต้น
ด้วยการศึกษาวิธีการวัดแบบนั้นในแง่ของทฤษฎีโดยละเอียด ดังที่เขียนไว้ข้างล่างนี้

1.1 วัตถุระนาบขอบตรงขนาดกว้างมาก

ขอให้เราเริ่มจากการพิจารณาวัตถุระนาบหนา d มีขนาดกว้างมากและมีขอบตรง
(semi-infinite plane) เราให้ขอบด้านหนึ่งอยู่บนแกน x ที่จุดศูนย์กลาง (origin)
จัดให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้า I (ดูรูป 1.1a) ชั้นแรกขอให้เราพิจารณาศักย์ไฟฟ้าบนวัตถุ
ที่จุดต่าง ๆ เนื่องจากผลึกมีขนาดใหญ่มากกระแสไฟฟ้าจะกระจายออกโดยรอบอย่างสม่ำเสมอ
โดยใช้ cylindrical coordinate ที่จุดซึ่งห่างจากจุด O เป็นระยะ r ความหนาแน่น
ของกระแสไฟฟ้า

$$j_r^{\wedge} = \frac{I r^{\wedge}}{\pi r d} \quad (1.1)$$

เนื่องจาก j เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้า E ดังสมการ $j = \sigma E = (1/\rho)E$ โดย ρ
เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ จากสมการข้างบนเราได้

$$E_r^{\wedge} = \frac{\rho I r^{\wedge}}{\pi r d} \quad (1.2)$$

ถ้า V เป็นศักย์ไฟฟ้าที่จุดใด ๆ เราจะได้ $E = -\nabla V$ จากสมการข้างบน

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{\rho I}{\pi r d} \quad (1.3)$$

ซึ่งจะได้

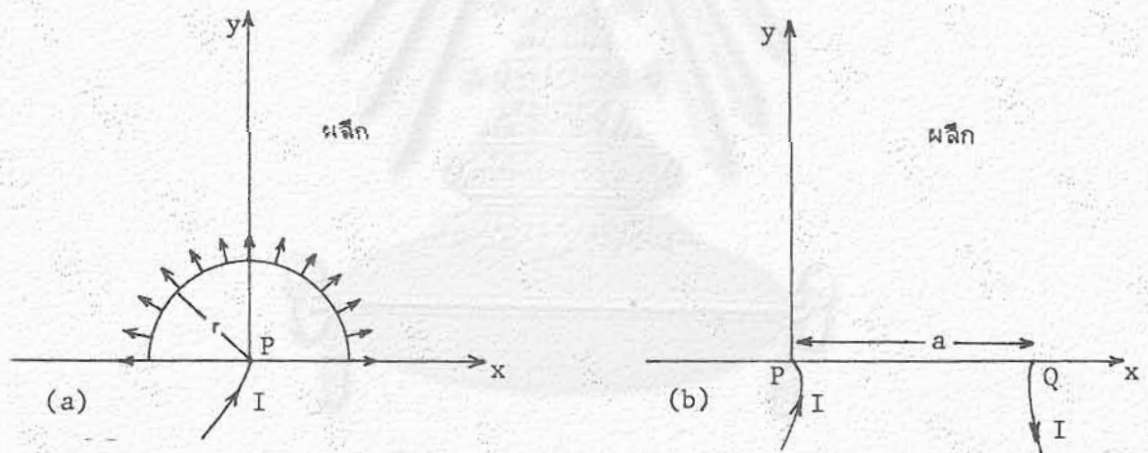
$$V = -\frac{\rho I}{\pi d} \int \frac{dr}{r}$$

$$V = -\frac{\rho I}{\pi d} \ln r = \frac{\rho I}{2\pi d} \ln(x^2 + y^2) \quad , \quad r \neq 0 \quad (1.4)$$

โดยเราให้ค่าคงที่ของการอินทิเกรตเป็นศูนย์

ถ้ามีกระแส I ไหลออกจากจุด Q ซึ่งห่างจาก P ไปทางขวาเป็นระยะ a (ดูรูป 1.1b) เราอาจพิจารณาคล้าย ๆ กับข้างบนได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ

$$V = \frac{\rho I}{2\pi d} \ln [(x-a)^2 + y^2] \quad ; \quad x \neq a, \quad y \neq 0 \quad (1.5)$$



รูป 1.1 วัตถุเนื้อเดียวกันสามเหลี่ยมรอบจุดที่มีระยะห่างบน (a) มีกระแส I ไหลเข้าที่จุด P (b) มีกระแส I ไหลออกที่จุด Q ในที่นี้ P และ Q เป็น current source และ current sink ตามลำดับ

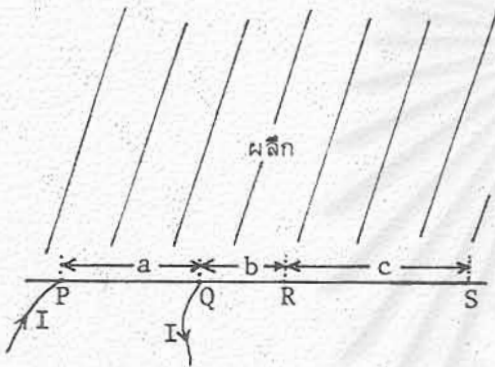
ในกรณีที่กระแส I ไหลเข้าที่ P และออกที่ Q ดังในรูป 1.2 ศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ อาจหาได้จากการรวมสมการข้างบนทั้งสองเข้าด้วยกัน เราได้

$$V = \frac{\rho I}{2\pi d} \ln \left[\frac{(x-a)^2 + y^2}{x^2 + y^2} \right] \quad (1.6)$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi d} \ln \left[\frac{(x-a)^2 + y^2}{x^2 + y^2} \right] \quad (1.6)$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ขอบคานกลางของสาร หรือบนแนว $y = 0$ เราได้

$$V = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \left[\frac{x-a}{x} \right] \quad (1.7)$$



รูป 1.2 ศักย์ไฟฟ้าที่ขอบคานกลางของระนาบ
เมื่อมี P และ Q เป็น
current source และ
current sink

ตามรูป จากสมการนี้เราอาจหาศักย์ไฟฟ้าที่จุด R และ S ได้ดังนี้

$$V_R = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{b}{a+b}, \quad (x = a+b) \quad (1.8)$$

$$V_S = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{b+c}{a+b+c}, \quad (x = a+b+c) \quad (1.9)$$

$$\text{นั่นคือ } V_S - V_R = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{(b+c)(a+b)}{b(a+b+c)} = V_{SR} \quad (1.10)$$

ถ้าเราจำกัดความ $R_{PQ,RS} = V_{SR}/I$ เราจะได้

$$R_{PQ,RS} = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{(b+c)(a+b)}{b(a+b+c)} \quad (1.11)$$

ในกรณีที่กระแส I ไหลเข้าที่ Q และไหลออกที่ R เพื่อความสะดวกเราถือจุด Q เป็นจุดศูนย์กลาง เราอาจหาศักย์ไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ในแนวแกน x ได้เช่นเดียวกับกรณีข้างบน

$$V = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{x-b}{x} \quad (1.12)$$

ในกรณีที่จุด P , $x = -a$; ที่จุด R , $x = b$; ที่จุด S , $x = b + c$ นั่นคือ

$$V_P = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{a+b}{a}$$

$$V_S = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{c}{b+c}$$

$$V_P - V_S = \frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{ac} = V_{PS} \quad (1.13)$$

นั่นคือ $R_{QR,SP} = V_{PS}/I = \frac{\rho}{\pi d} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{ac} \quad (1.14)$

จากสมการ (1.11) เราได้

$$\frac{\pi d R_{PQ,RS}}{\rho} = \ln \frac{(b+c)(a+b)}{b(a+b+c)}$$

$$\frac{b(a+b+c)}{(b+c)(a+b)} = \exp(-\pi d R_{PQ,RS}/\rho) \quad (1.15)$$

และจากสมการ (1.14) เราได้

$$\frac{ac}{(b+c)(a+b)} = \exp(-\pi d R_{QR,SP}/\rho) \quad (1.16)$$

เนื่องจาก $ac + b(a + b + c) = (a + b)(b + c)$ จากสมการ (1.15) + (1.16) จะได้

$$\exp(-\pi d R_{PQ,RS}/\rho) + \exp(-\pi d R_{QR,SP}/\rho) = 1 \quad (1.17)$$

ถ้าที่ขอบตรงของแผ่นสารตัวอย่างเนื้อเดียว (homogeneous) ที่มีความหนาสม่ำเสมอ เราปล่อยกระแส I เข้าที่จุด P และออกที่จุด Q จากนั้นวัดความต่างศักย์ V_{SR} เพื่อคำนวณ $R_{PQ,RS} = V_{SR}/I$ ขึ้น ต่อมาปล่อยกระแส I เข้าที่จุด Q ออกที่จุด R จากนั้นวัด V_{RS} เพื่อคำนวณ $R_{QR,SP} = V_{RS}/I$ พบว่าค่าที่ได้จะสอดคล้องกับสมการ (1.17) และถ้าเราทราบความหนาของสารตัวอย่าง เราอาจคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารได้

สมการ (1.17) ที่พิสูจน์มาแล้วใช้ได้เฉพาะผลึกขนาดใหญ่ขอบตรง แต่เราอาจใช้เทคนิคของ conformal mapping พิสูจน์ว่าสมการ (1.17) นี้ใช้ได้กับผลึกระนาบทุกรูปแบบได้ ดังจะได้อธิบายต่อไป

1.2 การส่งแบบคอนฟอร์ม (conformal mapping)

พิจารณาระนาบเชิงซ้อน

$$z = x + iy \quad (1.18)$$

และระนาบเชิงซ้อน

$$w = f(z) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (1.19)$$

สำหรับจุด (x, y) ใด ๆ ในระนาบ z เราสามารถหาจุด $u(x, y), v(x, y)$ ในระนาบ w ได้ การกระทำแบบนี้เราถือว่าเป็นการส่ง (map) จุดจากระนาบ z ไปยังระนาบ w สำหรับเส้นโค้งใด ๆ ในระนาบ z ซึ่งประกอบด้วยจุดหลายจุดเรียงกัน เราถืออาจส่งจุดเหล่านี้ไปยังระนาบ w ซึ่งจะเรียงกันเป็นเส้นโค้งในระนาบ w นั้นหมายความว่า เราส่งเส้นโค้งจากระนาบ z ไปยังระนาบ w นั้นเอง

เพื่อแสดงตัวอย่างขอให้เราพิจารณาการส่ง

$$w = z^{\frac{1}{2}} \quad (1.20)$$

ซึ่งเราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} z &= w^2 = (u + iv)^2 \\ &= u^2 - v^2 + 2uvi \end{aligned} \quad (1.21)$$

นั่นคือ $x = u^2 - v^2 \quad (1.22)$

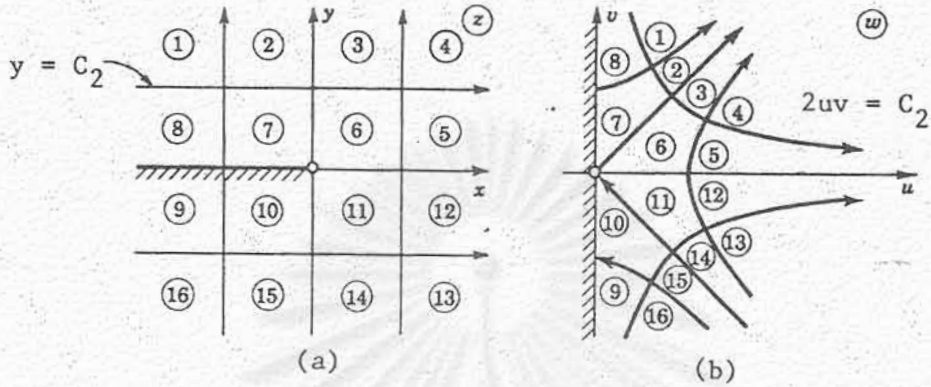
$$y = 2uv \quad (1.23)$$

สำหรับเส้นโค้ง $x = C_1$

ใด ๆ เราจะได้เส้นโค้ง

$$u^2 - v^2 = C_1$$

ในระนาบ w นั้นหมายความว่าเส้นตรงในแนวตั้ง $x = C_1$ ในระนาบ z เมื่อส่งไปยังระนาบ w จะกลายเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบลา $u^2 - v^2 = C_1$ ในทำนองเดียวกันเส้นตรงในแนวราบ $y = C_2$ ใด ๆ จะกลายเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบลา $uv = C_2$ ในระนาบ w



รูป 1.3 การส่งเส้นตรง z ในระนาบ z (รูป a) ไปยังเส้นโค้งในระนาบ w โดยฟังก์ชัน $z = w^2$ (รูป b)

ถ้าพิจารณารูป (1.3a) จะมองคล้าย ๆ กันว่าเราตัดระนาบ z ในแนวแกน $-x$ และพื้นที่ทั้งสองขึ้นจนทับกัน y เส้น $x = C_1$ และ $y = C_2$ ทั้งหลายจะถูกบีบให้เป็นเส้นโค้ง $u^2 - v^2 = C_1$ และ $uv = C_2$ ดังในรูป (b)

ในระนาบ z ถ้าเส้นโค้งสองเส้นใด ๆ ตัดกันที่จุด ๆ หนึ่งโดยทำมุม θ ต่อกัน สำหรับการส่ง $w = z^2$ เราอาจพิสูจน์ได้ว่าถ้าเราส่งเส้นโค้งทั้งสองไปยังระนาบ w ในระนาบนี้เส้นโค้งทั้งสองจะตัดกันโดยทำมุม θ เช่นกัน ในกรณีที่มุมตัดของเส้นโค้งไม่เปลี่ยนแปลงในการส่ง เรากล่าวว่าการส่งเป็นแบบคอนฟอร์ม (conformal mapping) จากการสังเกตรูป (1.3a,b) ช่างบน เราพบว่าเส้น $x = C_1, y = C_2$ ตัดกันเป็นมุม 90° ขณะเดียวกันเส้นโค้ง $u^2 - v^2 = C_1$ และ $uv = C_2$ ก็ตัดกันเป็นมุม 90° ในระนาบ w ด้วย

ถ้าเราสมมุติว่าระนาบ xy เป็นแผ่นสารซึ่งมีความหนาแน่นคงที่ (d) และมีกระแสไฟฟ้าตรงคงที่ไหลในระนาบนี้ ถ้า E เป็นสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ จะได้

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (1.24)$$

$$\text{หรือ} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (1.25)$$

โดย V เป็นศักย์ไฟฟ้า ในกรณีนี้เราอาจสมมุติศักย์ไฟฟ้าเชิงซ้อน

$$P = V(x, y) + iU(x, y) \quad (1.26)$$

โดย V และ U มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial y} \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\partial U}{\partial x} \quad (1.28)$$

นั่นคือ P เป็น analytic function และจากสมการข้างบนเราจะได้ว่า

$$\nabla^2 V = \nabla^2 U = 0 \quad (1.29)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอาจหาได้จาก

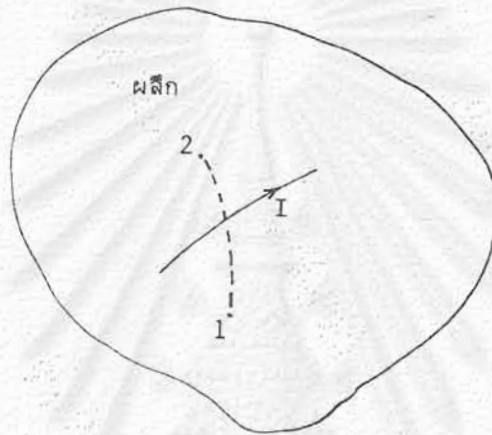
$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}V \quad (1.30)$$

$$\text{แต่} \quad \vec{j} \cdot \vec{\nabla}U = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla}V \cdot \vec{\nabla}U = 0 \quad (1.31)$$

นั่นคือ $\vec{j} \perp \vec{v}$ นั้นหมายความว่า \vec{j} อยู่ในแนวเดียวกับเส้น $U = \text{คงที่}$
 ดังนั้นเส้น $U = \text{คงที่}$ ก็คือ streamline ของกระแสนั้นเอง

อาจพิสูจน์ได้ว่าในรูป 1.4 กระแสที่ผ่านจุด 1 และจุด 2 จากซ้ายไปขวาเท่ากับ

$$I = -\frac{d}{\rho} \int_1^2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} dx - \frac{\partial v}{\partial x} dy \right)$$



รูป 1.4 กระแสไฟฟ้าซึ่งผ่านจุด 1, 2 จากซ้ายไปขวา

$$\begin{aligned} &= -\frac{d}{\rho} \int_1^2 \left(-\frac{\partial U}{\partial x} dx - \frac{\partial U}{\partial y} dy \right) \\ &= \frac{d}{\rho} (U_2 - U_1) \end{aligned} \quad (1.32)$$

โดยอาศัย mapping function ที่เหมาะสม

$$w = f(z) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (1.33)$$

ในระนาบ w เราอาจหา complex potential ได้โดยมีหลักดังนี้ จาก (1.33)

เราหา x และ y ในเทอมของ u และ v

$$x = x(u, v)$$

$$y = y(u, v)$$

แทนค่า x, y นี้ลงใน complex potential

$$P = V(x, y) + iU(x, y)$$

$$= V(u, v) + iU(u, v) \quad (1.34)$$

โดย differentiation ตรง ๆ เราอาจพิสูจน์ได้ว่า

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \frac{\partial V}{\partial u} + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial v^2} \right)$$

(1.35)

ถ้า w เป็น analytic function

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

และเนื่องจาก

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \left| f'(z) \right|^2$$

สมการ (1.35) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \left| f'(z) \right|^2 \left(\frac{\partial^2 V'}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 V'}{\partial v^2} \right) \quad (1.36)$$

นอกจากในกรณี $f'(z) = 0$ เราจะได้ว่าถ้า $V(x, y)$ เป็นศักย์ไฟฟ้าในระนาบ z

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (1.37)$$

เราจะได้

$$\frac{\partial^2 V'}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 V'}{\partial v^2} = 0, \quad V' = V(u, v) \quad (1.38)$$

นั่นคือ $V' = V(u, v)$ ก็เป็นศักย์ไฟฟ้าในระนาบ w สอดคล้องกับกฎทางฟิสิกส์ด้วย

ในการเปลี่ยนรูปร่างทางเรขาคณิตนี้ เส้นโค้ง $U(x, y) = C_2$ ในระนาบ z ซึ่งเป็นแนวทางของกระแสในระนาบ z ก็จะกลายเป็นเส้นโค้ง $U(u, v) = C_2$ ในระนาบ w ซึ่งจะเป็นแนวทางของกระแสในสภาพทางเรขาคณิตที่ต่างกันไปในนั้น

เพื่อแสดงตัวอย่างให้ชัดเจน ขอให้เราพิจารณารูป (1.3a) สมมุติว่ากระแสกำลังไหลอย่างสม่ำเสมอในทิศ $+x$ เราจะได้

$$P = V(x, y) + iU(x, y) = x + iy \quad (1.39)$$

กระแสไหลในทิศ

$$\vec{c}V = \vec{c}x = \hat{i} \quad (1.40)$$

และไหลในแนว $U =$ คงที่ หรือ แนว $y =$ คงที่ $= C_2$

ในระนาบ w เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนี้ $x = u^2 - v^2, y = 2uv$ เราได้

$$\begin{aligned} P &= V(u, v) + iU(u, v) \\ &= u^2 - v^2 + 2uvi \end{aligned} \tag{1.41}$$

กระแสจะไหลในแนว

$$2uv = C_2 \tag{1.42}$$

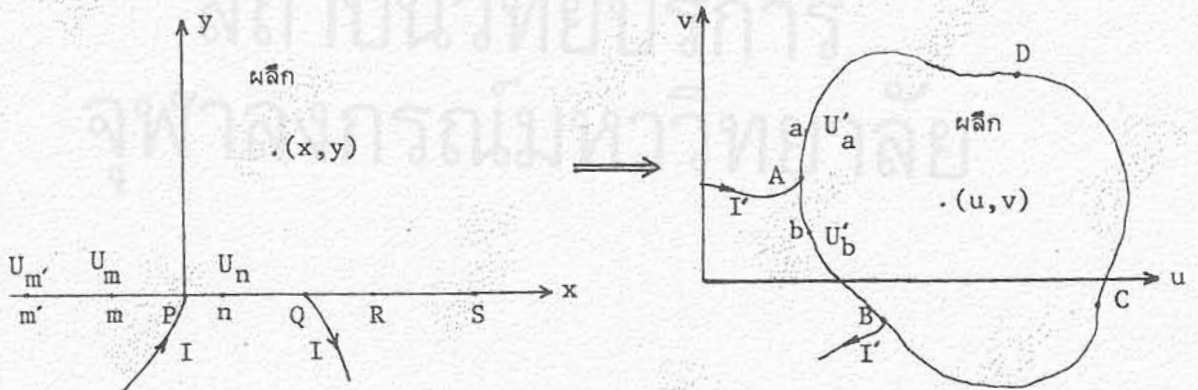
ซึ่งเป็นเส้นโค้งไฮเพอร์โบลา

เราอาจมองเห็นได้ว่า เมื่อพับแกน $-x$ ขึ้น 90° ไปเป็นแนว $\pm y$ กระแสที่ไหลในแนว $+x$ ข้างล่างและข้างบนของแกน x ในระนาบ w จะพุ่งเข้าหากันจากด้านล่างและด้านบน เมื่อพับกันตรงกลางก็จะเบนออกไปในแนว $+u$ ดังในรูป

เราอาจใช้เทคนิคของการส่งแบบคอนฟอร์มน์ที่พิสูจน์ว่าสมการ (1.17) เป็นจริงสำหรับทุกรูปร่างหน้าตัดของสารตัวอย่าง ดังจะได้อธิบายต่อไป

1.3 ทฤษฎีของแวนเดอ พาว สำหรับผลึกแบนรูปต่าง ๆ

โดยใช้ฟังก์ชันส่ง $w = f(z)$ ที่เหมาะสม ผลึกขอบตรงในระนาบ $z = x + iy$ ในรูป a จะกลายเป็นผลึกโค้งในระนาบ $w = u + iv$ ซึ่งมีรูปปร่างตามต้องการดังในรูป b



รูป 1.5 การส่งผลึกขอบตรงในระนาบ z ไปยังผลึกโค้งในระนาบ w

จุด (x, y) จะถูกส่งไปยังจุด (u, v) จุด P, Q, R และ S ที่ขอบของผลึกตรง จะถูกส่งไปยังจุด A, B, C และ D ที่ขอบของผลึกโค้งตามลำดับ

$$\begin{aligned} (x, y) &\rightarrow (u, v) \\ P &\rightarrow A \\ Q &\rightarrow B \\ R &\rightarrow C \\ S &\rightarrow D \end{aligned} \tag{1.43}$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าเชิงซ้อน $V(x, y)$ และ $U(x, y)$ ในระนาบ z จะกลายเป็น $V'(u, v)$ และ $U'(u, v)$ ในระนาบ w ตัวอย่างเช่นสำหรับการส่ง

$$w = z^{\frac{1}{2}} \tag{1.44}$$

เราได้ $x = u^2 - v^2$ (1.45a)

$$y = 2uv \tag{1.45b}$$

สมมติเป็นตัวอย่างว่า $V = x + y$ (1.46a)

จะได้ $V' = u^2 - v^2 + 2uv$ (1.46b)

เราอาจแสดงได้ว่าถ้า $(x_1, y_1) = (u_1, v_1)$

จะได้ $V(x_1, y_1) = V'(u_1, v_1)$

ซึ่งจะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ P, Q, R และ S จะมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ A, B, C และ D ตามลำดับ

ในรูป a เนื่องจากกระแส I เข้าที่จุด P และออกที่จุด Q เท่านั้น จากสมการ (1.32) จะได้ว่าจุดที่ขอบของผลึกทางซ้ายของ P จะมีค่า U เท่ากัน (เช่นตาม

รูป $U_m = U_m'$ เพราะไม่มีกระแสผ่านช่วง mm') ค่า U ระหว่าง P ถึง Q ก็เช่นกัน และจากสมการ (1.32) จะได้

$$U_m - U_n = \frac{\rho I}{d} \quad (1.47)$$

ถ้าผลึกโค้งในรูป b มีความหนา d' มีสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ' และมีกระแสไฟฟ้าเข้าและออกที่จุด A และ B เทียบกับ I' ตามรูปจะได้

$$U'_a - U'_b = \frac{\rho' I'}{d'} \quad (1.48)$$

แต่ $U_m = U'_a$, $U_n = U'_b$ นั่นคือจากสมการทั้งสอง

$$\frac{\rho I}{d} = \frac{\rho' I'}{d'} \quad (1.49)$$

ในรูป b พิจารณาปริมาณ

$$\begin{aligned} -\frac{\pi d' R_{AB,CD}}{\rho'} &= -\frac{\pi d'}{\rho'} \cdot \frac{V_{DC}}{I'} \\ &= -\frac{\pi d'}{\rho' I'} \cdot V_{SR} \quad (\text{เพราะ } V_{DC} = V_{SR}) \\ &= -\frac{\pi d}{\rho I} \cdot V_{SR} \quad (\text{ใช้สมการ (1.49)}) \\ &= -\frac{\pi d}{\rho} \cdot R_{PQ,RS} \end{aligned} \quad (1.50)$$

ในทำนองเดียวกันอาจพิสูจน์ได้ว่า

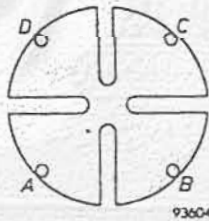
$$-\frac{\pi d' R_{BC,DA}}{\rho'} = -\frac{\pi d}{\rho} \cdot R_{QR,SP} \quad (1.51)$$

แทนสมการ (1.50), (1.51) ลงในสมการ (1.17) เราได้

$$\exp(-\pi d'R_{AB,CD}/\rho') + \exp(-\pi d'R_{BC,DA}/\rho') = 1 \quad (1.52)$$

จะเห็นได้ว่าสมการในรูปนี้ใช้ได้สำหรับผลึกแบบความหนาสม่ำเสมอทุกรูป ในการวิจัยเราใช้สมการนี้ในการหาสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของผลึก

ในการทดลอง สัมผัสทางไฟฟ้าที่จุด A, B, C และ D ไม่ได้มีขนาดเล็กจนเป็นจุดอย่างทีกล่าวไว้ในทฤษฎี อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ความคลาดเคลื่อนของ ρ จะไม่มากถ้าขนาดของสัมผัสทางไฟฟ้านี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของผลึก ผลึกที่มีรูปร่างเว้าแหว่งมากเช่นในรูป 1.6 จะมีเส้นรอบรูปยาวมาก ถึงแม้ว่าสัมผัสทางไฟฟ้าจะมีขนาดใหญ่ ก็ยังจะให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงกว่าผลึกรูปแบบอื่น ๆ



รูป 1.6 ผลึกที่มีเส้นรอบรูปยาวมาก

สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) นั้น เราสร้างสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอในทิศตั้งฉากกับระนาบของผลึก โดยการใช้กระแส I เข้าที่จุด B และออกที่จุด D เราอาจวัด $R_{BD,AC}$ ได้จากสมการ

$$R_{BD,AC} = \frac{V_{CA}}{I} \quad (1.53)$$

ถ้า $\Delta R_{BD,AC}$ เป็นผลต่างของ $R_{BD,AC}$ ขณะที่ไม่มีส่วนแม่เหล็ก และขณะที่มีส่วนแม่เหล็ก B เราอาจพิสูจน์ได้ว่า Hall mobility ของผลึกอาจเขียนได้เป็น

$$\mu_H = \frac{d}{B} \cdot \frac{\Delta R_{BD,AC}}{\rho} \quad (1.54)$$

โดยวิธีนี้เราสามารถหาค่า μ_H ซึ่งอาจนำไปหาความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า (n) ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมสารกึ่งตัวนำซัลโคไฟไรท์^{2,3}

สารกึ่งตัวนำซัลโคไฟไรท์ เกิดจากการหลอมรวมกันของธาตุกลุ่ม I, III และ VI ดังสูตร I-III-VI₂ หรือธาตุกลุ่ม II, IV และ V ดังสูตร II-IV-V₂ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบซัลโคไฟไรท์นี้เมื่อพิจารณาแล้วก็คือการแทนที่ธาตุกลุ่มที่ III ในสารกึ่งตัวนำประกอบ III-V ด้วยธาตุในกลุ่ม II และ IV และแทนที่ธาตุกลุ่มที่ II ในสารกึ่งตัวนำประกอบ II-VI ด้วยธาตุในกลุ่ม I และ III โดยที่ยังคงทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเฉลี่ยต่ออะตอมเท่ากับสี่ สารกึ่งตัวนำซัลโคไฟไรท์ที่พบเกิดตามธรรมชาติคือ CuFeS₂ สารกึ่งตัวนำซัลโคไฟไรท์ที่ทำการศึกษาคือกลุ่ม I-III-VI₂ นอกจากสารประกอบตามสูตรแล้วยังอาจเตรียมเป็นสารละลายตามสูตร

$(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)(\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y)(\text{Se}_{1-z}\text{Te}_z)_2$ จะเป็นอะลอยในกลุ่มธาตุที่ I, III หรือ VI แล้วแต่ความสนใจของแต่ละกลุ่มบุคคล พิจารณาจากสูตรข้างต้นโดยการแปรค่า x, y หรือ z จะเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำมากมายที่มีคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์ที่ต่างกันอย่างออกไป เนื่องจาก

เวลามีจำกัด การศึกษาครั้งนี้จึงเลือกศึกษาผลึก 4 ผลึก กล่าวคือ $\text{Cu}_{0.25}\text{Ag}_{0.75}\text{GaSeTe}$, $\text{Cu}_{0.5}\text{Ag}_{0.5}\text{InTe}_2$, $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Te}_2$, $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_2$ ซึ่งสามารถเตรียมได้ และสามารถประกอบในแผ่นยึดผลึกไมยากนัก

2.1 การชั่งธาตุต่าง ๆ เพื่อนำมาหลอมรวมกัน

เริ่มจากสูตรโมเลกุลของสารประกอบ นำมาหาจำนวนโมเลกุลของสารประกอบที่ต้องการเตรียม กำหนดน้ำหนักสารที่ต้องการให้มากพอเหมาะกับการที่จะนำไปทดลองวัดค่าทางฟิสิกส์ต่าง ๆ จากนั้นจึงหาน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ที่ต้องการเพื่อนำมาหลอมที่อุณหภูมิสูงให้หลอมรวมกันเป็นสารประกอบต่อไป เช่นในการทดลองนี้เลือก $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Te}_2$ จากน้ำหนักอะตอมของธาตุ หาน้ำหนักโมเลกุลได้เท่ากับ 468.82 หน่วย ต้องการน้ำหนักสารเพื่อใช้ทดลอง 5 กรัมต้องใช้ $\text{Ag} = 1.1499$ กรัม $\text{In} = 0.9767$ กรัม และ $\text{Te} = 2.7217$ กรัม $\text{Ga} = 0.1487$ กรัม

เมื่อชั่งธาตุต่าง ๆ ได้ตามต้องการแล้ว จึงนำมาบรรจุหลอดควอทซ์ที่ทำความสะอาดแล้ว นำไปลงไฟให้เกิดส่วนควบให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อนำไปป้อนอากาศออกต่อไป

จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เมื่อเตาเย็นแล้วจึงนำสารที่ได้จากการหลอมแล้วไป
 ปลุกผลึกเดี่ยวต่อไป การหลอมโดยวิธีการธรรมดาแล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ
 บางครั้งก็ประสบความยุ่งยากคือหลอดบรรจุสารแตกที่อุณหภูมิยังสูงอยู่ในขณะสารผ่าน
 การเปลี่ยนเฟส (phase) ทำให้สารไหม้เสียไปหรืออาจได้สารที่มีรูพรุนมาก ไม่เหมาะ
 ที่จะนำมาวัดสมบัติทางแสงหรือไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ บางครั้งอาจจำเป็น
 ต้องทำสารให้เย็นโดยการแช่ลงในน้ำขณะที่สารยังหลอมละลายอยู่ ช่วยให้ได้สารที่มีรูพรุน
 น้อยลง

เนื่องด้วยสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการผสมของธาตุ 3 อย่างที่กล่าวแล้วนั้นเป็น
 ของใหม่ เพิ่งได้รับความสนใจราว 10 - 12 ปี ดังนั้นข้อมูลสำหรับวิธีการเตรียมผลึก
 ยังไม่มีวิธีการที่มาตรฐานทั่วไป วิธีการที่ใช้ศึกษานี้ก็เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีที่ใช้กัน

2.2 การปลุกผลึกเดี่ยว

เมื่อได้สารจากการหลอมรวมของธาตุแล้ว ก็นำไปปลุกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีการ
 2 แบบ คือ ใช้ไอโอดีนเป็นตัวพาหะและวิธีการแบบบริดจ์แมน (Bridgman)

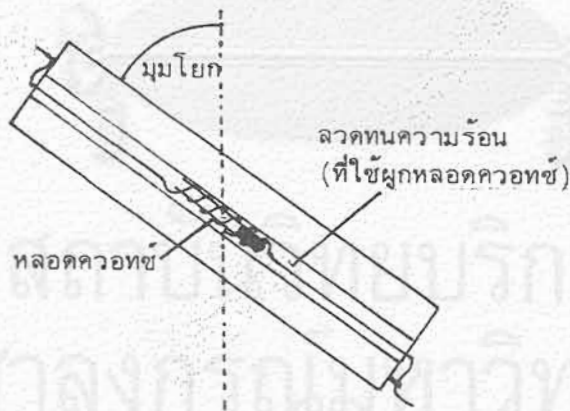
2.2.1 การปลุกผลึกเดี่ยวโดยวิธีการไอโอดีนเป็นตัวพาหะ

สาร Polycrystalline ที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการหลอมธรรมดา
 จะนำมาคั่วให้ละเอียด บรรจุหลอดแก้วที่แช่ไว้ในกรดกัตทอง ($\text{HNO}_3 : \text{HCl} = 1 : 3$)
 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาล้างด้วยน้ำ deionized อบไทแห้ง แล้วนำไปอบ
 ในเตาอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง บรรจุสารและธาตุไอโอดีนตัวพาหะ
 ในปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำหลอดให้คอดแล้วนำไปป้อนอากาศออก
 จนกระทั่งความดันลดเหลือ 10^{-5} ทอร์ ขณะที่ปั๊มนี้แช่หลอดที่บรรจุสารด้วยในโตรเจนเหลว
 เพื่อป้องกันมิให้ธาตุไอโอดีนถูกดูดออกไป ทำการปิดหลอดบรรจุสารนำไปใส่เตาชนิด 2 โซน
 (zone) มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแยกกันดังรูป 2.2

วัตถุประสงค์ของการทำหลอดไฟคอมมี 2 อย่าง คือ หนึ่งสะดวกแก่การปิดหลอดเมื่อปั๊มอากาศออกจนได้ที่แล้ว สองเพื่อกันมิให้ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยถูกปั๊มออกไปด้วย

ปั๊มที่ใช้ปั๊มอากาศออกจากหลอดคือ Diffusion Pump ความสามารถของปั๊ม ถ้าเปิดปั๊มเพื่ออุ่นล่วงหน้าสัก 7 - 8 ชั่วโมงจะปั๊มได้ในความดัน 10^{-5} ทอร์ โดยไม่ต้องใช้ในโครเจนเหลว แต่ต้องการความดันต่ำกว่านี้และใช้เวลาน้อยกว่านี้ก็จำเป็นต้องใช้ในโครเจนเหลวช่วย เมื่อปั๊มจนความดันต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ จึงปิดหลอดบรรจุธาตุเพื่อนำไปหลอมให้รวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบต่อไป

การหลอมก็ใช้วิธีการธรรมดาทั่วไป คือ นำหลอดบรรจุธาตุผูกไว้ด้วยลวดทนความร้อน หรือจะใส่ในภาชนะทนไฟก็ได้ ให้แน่นให้หลอดอยู่บริเวณกลางเตาเผาให้มากที่สุด เพิ่มอุณหภูมิเตาในอัตรา 360°C ต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 1200°C คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การที่เลือกอุณหภูมิ 1200°C โดยยึดหลักค่าอุณหภูมิหลอมละลายสูงสุดของธาตุเป็นที่ตั้ง ในที่นี้ธาตุที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูงสุดคือธาตุเงิน 961.39°C การตั้งอุณหภูมิให้สูงไว้เพื่อว่าธาตุต่าง ๆ หลอมละลายดี ลดความหนืดของสารละลาย ในขณะที่หลอมจะโยกเตาไปมาเพื่อให้ธาตุผสมกันดี ดังแสดงได้ตามรูป 2.1



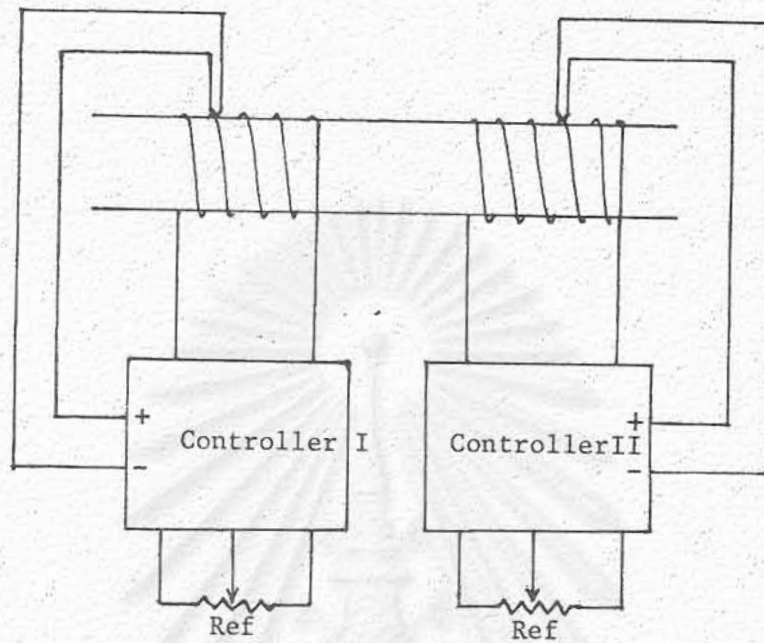
รูปที่ 2.1 แสดงเตาที่ใช้หลอมสาร

เริ่มต้นโดยการอุ่นเตาให้ตลอดทั้ง 2 ปลายมีอุณหภูมิสูงเท่ากัน 660°C รักษาอุณหภูมิไว้ให้คงที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อเป็นการทำความสะอาดปลายที่จะให้เกิดผลึกอีกครั้ง จากนั้นก็ลดอุณหภูมิปลายว่างลงให้เหลือ 610°C แล้วรักษาอุณหภูมินี้ไว้จนกว่าจะสังเกตเห็นผลึกเกิดขึ้นที่ปลายว่างนี้ ระยะเวลาที่ใช้ไม่สามารถกำหนดหรือคาดการณ์ได้ อัตราการเกิดผลึกขึ้นกับตัวประกอบหลายอย่าง เช่นปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีนกับสาร ความดันไอของสาร และไอของไอโอดีน ความเหมาะสมของ temperature gradient ความสะอาดและความสมบูรณ์ของหลอดและอื่น ๆ อีกหลายอย่าง ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้คือระบบกระแสไฟฟ้ามักจะดับบ่อย เมื่อไฟฟ้าดับขบวนการต่าง ๆ ก็ผิดพลาดไปทำให้ไม่เกิดผลตามคาดหมาย

2.2.2 การปลูกผลึกเดี่ยวโดยวิธีการบริจแมน

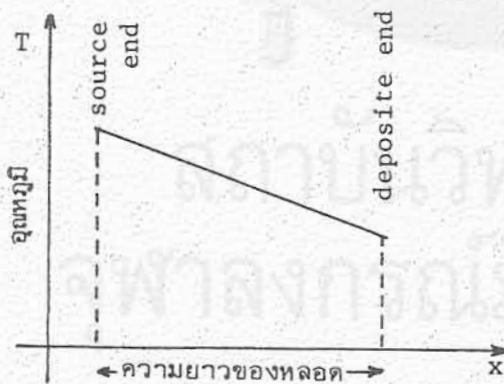
การปลูกผลึกโดยวิธีการนี้ ไม่จำเป็นต้องนำสารที่หลอมโดยวิธีการธรรมดาแบบบรรจุใหม่ นำสารที่หลอมแล้วมาใส่เตาชนิด 2 โซนแบบตั้ง วางสารไว้ตำแหน่งที่ทำการวัดลักษณะของอุณหภูมิในเตาแล้ว อุ่นเตาให้ร้อนให้อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายของสารประมาณ $10 - 20^{\circ}\text{C}$ คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้อุณหภูมิในเตาสม่ำเสมอแล้วจึงทำการทดลองต่อไป ทำการลดอุณหภูมิของเตาลงอย่างช้า ๆ โดยการต่อ Ramp generater เข้าไปในวงจร thermocouple ดังรูป 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แสดงเตาและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

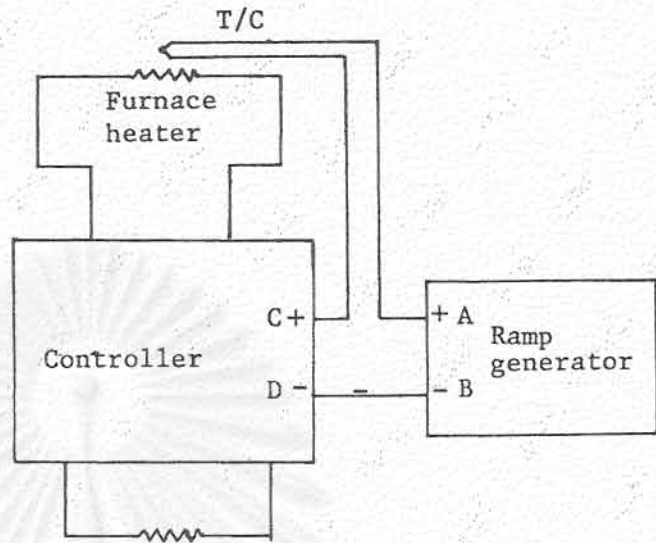
ครั้งแรกใช้วิธีการ stationary temperature profile (STP) ผลปรากฏว่าผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กมาก ขนาดใหญ่ที่สุดคือ $2 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ อุณหภูมิของเตาแสดงได้ดังกราฟ



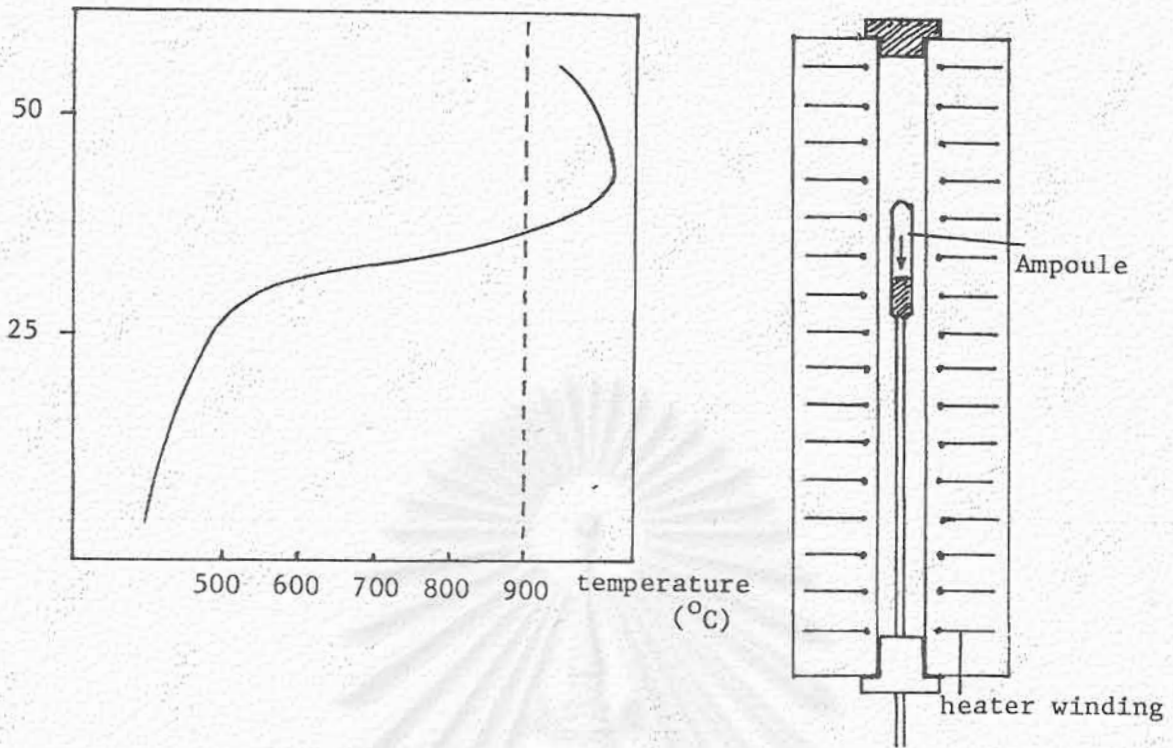
รูปที่ 2.3 แสดงอุณหภูมิของเตา

หลอดควอทซ์ที่ใช้ยาว 10 เซนติเมตร อุณหภูมิเตามี temperature gradient $5^\circ\text{C}/\text{cm}$ สำหรับสาร AgInTe_2 ตั้งอุณหภูมิของ source end ไว้ 660°C และ Deposite ตั้งไว้ 610°C

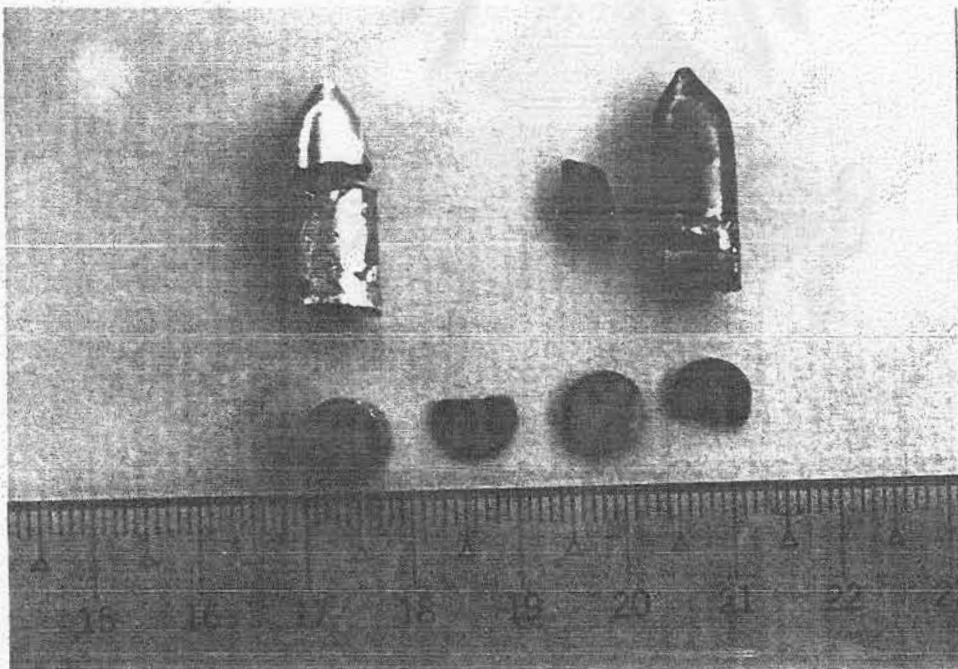
รูปที่ 2.4 แสดงถึงเตาและ
อุปกรณ์ ๆ ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิ



Ramp generator จะต่อแบบเสริมแรงคั่นเข้าไปกับ Thermocouple ดังนั้น
เมื่อแรงคั่นที่เกิดจาก Ramp generator เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปจะไปหักการจ่ายกระแส
ของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ฉะนั้นอุณหภูมิของเตาจะลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ในอัตรา 20°C
ต่อวัน



รูปที่ 2.5 แสดง temperature profile ของเตา แผนภาพเตาที่ใช้ปลูกผลึก



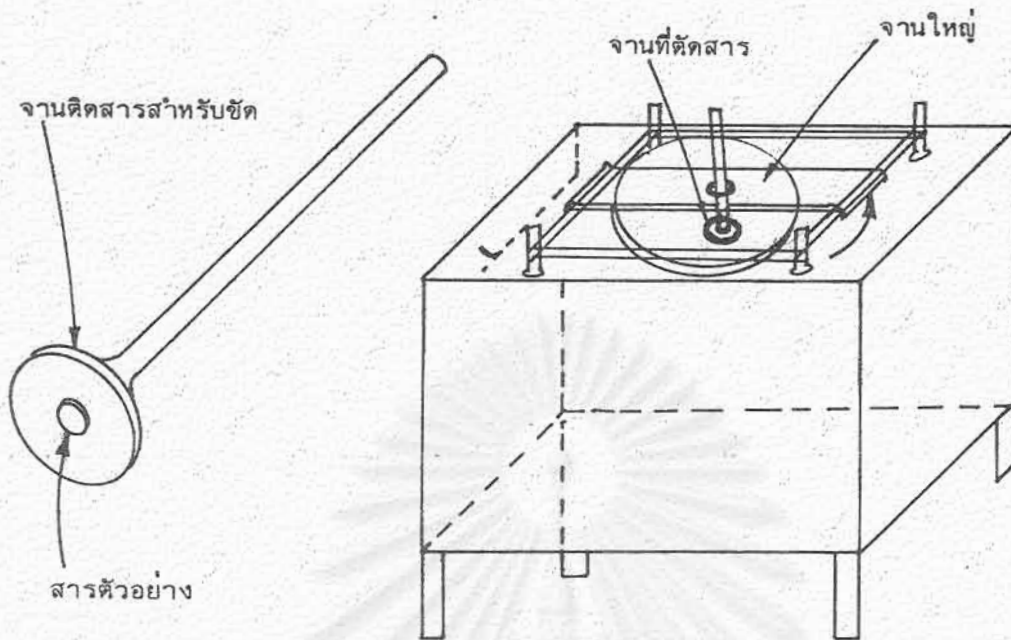
รูปที่ 2.6 ผลึกที่ได้จากการปลูกผลึก เสเกลที่แสดงเป็นเซนติเมตร

เมื่ออุณหภูมิของเตาต่ำกว่าจุดหลอมละลายของสาร ผลึกที่เกิดจะเรียงตัวจับกันเป็นก้อน ส่วนจะมีขนาดใหญ่หรือ เล็กขึ้นกับตัวประกอบหลายตัว เช่นทิศทางการเกิดของผลึก บริเวณผิวของหลอดควอทซ์จะมีความเสียหายต่อการจัดตัวของสาร เสถียรภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีส่วนสำคัญมาก ถ้าเกิดการกระเพื่อมของอุณหภูมิจะเกิดการไม่ต่อเนื่องของผลึกหรืออาจเกิดผลึกเดี่ยวเป็นหย่อม ๆ ปนกับ Polycrystalline จากแท่งผลึกที่ได้ขยำมือในภาพจะเห็นผลึกแยกออกเป็นชั้น ทางซ้ายมือก็แตกเป็น 2 ก้อน คือยังมีรอยแตกหรือรอยร้าวในผลึก อันเนื่องจากระนาบการเกิดของผลึกเกิดหลายทิศทาง ไม่ได้เริ่มจากจุดเดี่ยวแล้วแพร่ขยายออก ดังนั้นจึงเกิดปัญหาในการเลือกผลึกที่มีขนาดก้อนโตที่สมบูรณ์เพื่อใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

2.3 การตัดและการชักผิวผลึก

นำผลึกที่ได้จากการปลูกไปติดไว้กับแท่งไม้ที่เจาะรูไว้แล้วติดด้วยยางไม้ ยึดไว้กับแท่งจับงานของเครื่องตัด ใบเลื่อยกากเพชรความหนา 0.01 นิ้ว ใช้ความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำโดยธรรมชาติเป็นสารที่เปราะมาก ดังนั้นการป้อนงานจึงเพียงแต่อาศัยน้ำหนักของสารกับแท่งไม้เป็นแรงกดสำหรับการป้อนงาน แม้กระนั้นชิ้นสารที่ตัดถาวรขนาด 1 มิลลิเมตรก็ยังแตกอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นถ้าต้องการได้ชิ้นสารหนา 1 มิลลิเมตรจะต้องตัดให้หนา 1.5 มิลลิเมตร หรือหนากว่าเล็กน้อย แล้วนำไปชักกับกระดาษทรายน้ำอย่างละเอียดให้ได้ความหนาใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการแล้วจึงนำไปชักผิวให้เรียบต่อไป

นำชิ้นสารบางไปติดกับจานที่มีก้านยาวครึ่งรูปคylinder เหยียด แล้วนำไปชักบนจานใหญ่ที่หมุนด้วยมอเตอร์ จานใหญ่ที่ชักผิวสารคลุมไว้ด้วยผ้าที่ทำขึ้นสำหรับใช้ชักผิวดึงเต็มผงชักผสมน้ำลงไปบนจานใหญ่อย่างต่อเนื่องจะต้องชักผิวประมาณ 5 - 10 ชั่วโมงจึงจะได้ผิวเรียบสวยสำหรับนำไปทดลองต่อไป เนื่องจากวัสดุที่ชักนี้มีความประสงค์เพื่อวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเท่านั้น จึงไม่ต้องการความเงาเรียบของผิวมาก และเพื่อประหยัดเวลาจึงใช้ผงชักที่หยาบคือขนาด 1.0 μm ถ้าต้องการวัดสมบัติทางแสงต้องใช้ผงชักที่ละเอียดขนาด 0.1 μm และใช้เวลาดชักนานมากกว่าจึงจะได้ผิวที่เงามันเหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 2.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับชักสาร

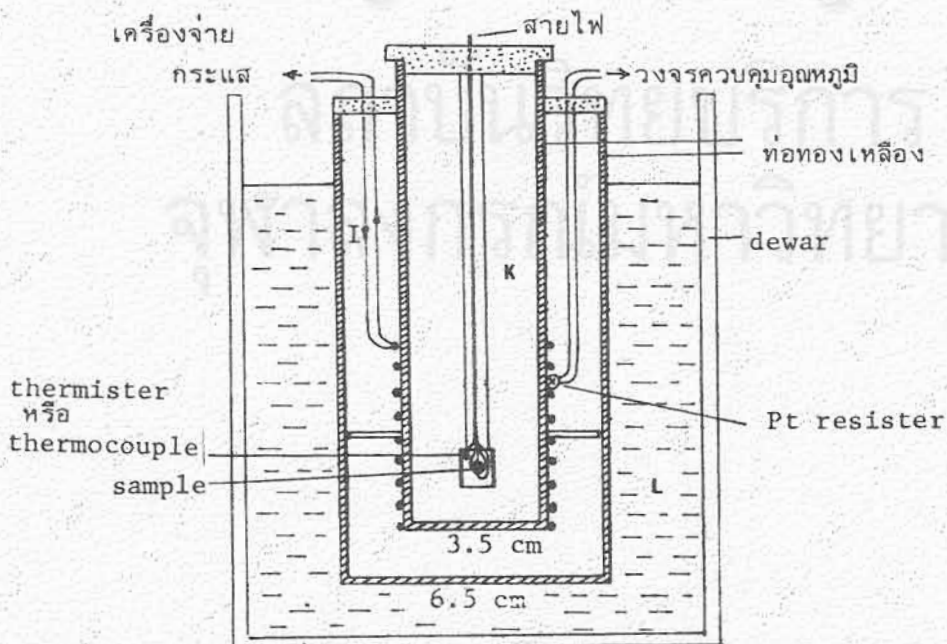
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองอาจแบ่งออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นเครื่องมือสำเร็จ เช่น digital multimeter, potentiometer, null detector เป็นต้น อีกส่วนหนึ่งเป็นเครื่องมือประกอบที่สร้างขึ้นเอง โดยมากใช้วัสดุที่ทำภายในประเทศ นอกจากชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น รายละเอียดของเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะกล่าวไว้อีกข้างล่าง

3.1 ทอบรรจุผลึกซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้

เครื่องมือประกอบด้วยท่อทองเหลืองกลมซ้อนกันสองชั้นยาว 30 ซม. มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.5 ซม. และ 3.5 ซม. ตามลำดับ (รูป 3.1) ท่อในพื้นด้วยลวดซึ่งให้ความร้อนขณะมีกระแสไฟฟ้าผ่านสูงประมาณ 13 ซม. ด้านบนมีฝาปิดทำด้วยแบคเคลไลต์ซึ่งมีรูเจาะให้สายไฟและอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่าน ฝาเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมของการทดลอง แกนกลางยาว (K) ที่บรรจุในท่อชั้นในทำด้วยแบคเคลไลต์บาง ๆ กว้าง 2.5 ซม. แกนนี้ติดกับฝากลมด้านบน ด้านล่างติดกับส่วนยึดผลึกซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งเกือบกลางสุดของท่อชั้นใน ท่อทั้งสองใส่อยู่ใน dewar ดังแสดงในรูป 3.1



รูป 3.1

ทอบรรจุผลึกซึ่ง
ควบคุมอุณหภูมิได้

ในการทดลองระหว่างท่อทองเหลืองกับ dewar จะบรรจุด้วยสารซึ่งทำหน้าที่เป็น heat sink ที่เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่จะทดลอง สารนี้อาจเป็นน้ำแข็ง (สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 0°C ขึ้นไป) น้ำแข็งแห้ง (สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ -70°C ขึ้นไป) และ ไนโตรเจนเหลว (สำหรับการทดลองที่ 77 K ขึ้นไป) เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ขดลวดความร้อนทำงานมากเกินไปอุณหภูมิรอบ ๆ ผลึกที่ต้องการควบคุมไม่ควรมากกว่าอุณหภูมิรอบนอกของ heat sink มากนัก

อุณหภูมิที่ผิวของท่อทองเหลืองคำนวณโดยใช้ความต้านทานพลาตินัมซึ่งความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิดังสมการ

$$R_p = 100 + 0.3974T - 5.8348 \times 10^{-5}T^2 \quad (3.1)$$

ความต้านทานนี้ติดไว้กับผิวท่อดังรูป 3.1 R_p เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการตัดต่อกระแสที่ผ่านขดลวดให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิที่ผลึกมีค่าเท่าที่ต้องการ

อุณหภูมิที่บริเวณผลึกจริง ๆ นั้นวัดโดย Thermistor หรือ Chromel-Alumel Thermocouple ความสัมพันธ์ของ thermistor กับอุณหภูมิได้จากการทดลอง ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ปลายอีกด้านของ thermocouple อาจหาได้จาก physical table ทั่ว ๆ ไป สำหรับการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เราวัดอุณหภูมิโดยใช้ thermistor ส่วน thermocouple ใช้สำหรับการทดลองเพื่ออุณหภูมิต่ำ ๆ เท่านั้น

3.2 เครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ

ในการวิจัยได้สร้างเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิให้ละเอียดใน ช่วง 0.2°C ส่วนสำคัญของวงจรของเครื่องมือนี้แสดงอยู่ข้างล่าง โดยใช้หม้อแปลงเราแปลงไฟฟ้า 220 V AC เป็นไฟฟ้า AC โวลต์ต่ำ จากนั้นเมื่อผ่านไดโอด 4 ตัวซึ่งต่อแบบบริดจ์เปลี่ยนเป็นไฟฟ้า DC ต่อมาใช้ตัวจุกและซีเนอร์ไดโอดปรับศักย์ไฟฟ้าให้เรียบและรักษาแรงดันให้คงที่ สุดท้ายเราได้ศักย์ไฟฟ้า

+ 6 V, 0 และ - 6 V ดังในรูป 3.3 ซึ่งแสดงวงจรควบคุมอุณหภูมิ

ตามรูป R_p เป็นความต้านทานของพลาตินัมที่ติดกับกระบอกทองเหลืองวงใน
 R_t เป็นที่ความต้านทาน

ถ้าอุณหภูมิที่กระบอกทองเหลืองรอบ ๆ ผลึกต่ำกว่าที่ต้องการ R_p จะมีค่าน้อยกว่า R_t ที่ตั้งไว้

$$R_p < R_t \quad (3.2)$$

จะได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่ A มากกว่าที่ B

$$V_A > V_B \quad \text{หรือ} \quad V_3 > V_2 \quad (3.3)$$

ในกรณีนี้ IC 741 จะจ่ายไฟให้แก่ทรานซิสเตอร์ขวาสุดจะทำงาน จะมีกระแสผ่านรีเลย์ สำหรับรีเลย์สองทางที่ใช้ ในกรณีนี้จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดความร้อนทำให้ตรงกระบอกทองเหลืองด้านในร้อนขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิมียุ่ค่ามากกว่าที่ต้องการ R_p จะมากกว่า R_t

$$R_p > R_t \quad (3.4)$$

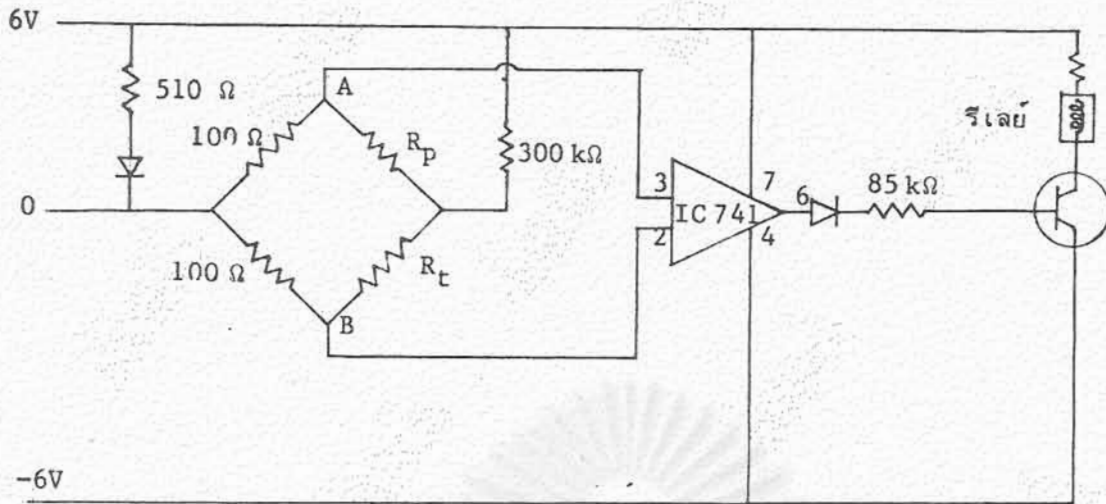
จะได้ $V_A < V_B$ หรือ $V_3 < V_2$ (3.5)

IC 741 จะปิดไม่กระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน ทำให้ไม่มีกระแสผ่านรีเลย์ รีเลย์จะตัดกระแสไปผ่านไปยังขดลวดความร้อน อุณหภูมิของทองเหลืองจะลดลง

จากหลักข้างบนเราอาจควบคุมอุณหภูมิของทองเหลืองรอบ ๆ ผลึกได้โดยตั้ง R_t ที่เหมาะสม ถ้าอุณหภูมิที่ต้องการเท่ากับ $t^{\circ}\text{C}$ ตรงกับความต้านทาน R_p เราตั้ง

$$R_t = R_p \quad (3.6)$$

และอุณหภูมิที่ผลึกที่วัดได้โดย thermistor หรือ thermocouple จะไม่แตกต่างจาก



รูป 3.2 วงจรของเครื่องมือควบคุมอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ผิวทรงกระบอกในมากนั้ โดยหลักการข้างบนอุณหภูมิที่ควบคุมได้ควรจะใกล้เคียงกับที่ต้องการ แต่ในความเป็นจริงพบว่าอุณหภูมิที่ควบคุมได้แตกต่างไปจากที่คาดไว้เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของ IC 741 นั้นเอง

จากการทดลองพบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ควบคุมได้กับ R_t เกี่ยวข้องกันดังสมการ

$$R_t = a + bt + ct^2 \quad (3.7)$$

ตัวอย่าง a , b และ c สำหรับเครื่องมือชุดหนึ่งที่ทำกรทดลองเป็นดังนี้

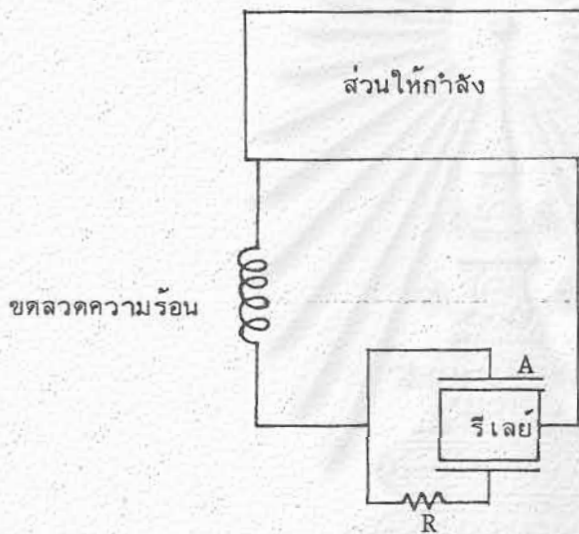
$$a = 100.49 \quad (3.8 a)$$

$$b = 0.39667 \quad (3.8 b)$$

$$c = -0.0004757 \quad (3.8 c)$$

ในทุกกรณี c จะมีค่าน้อยกว่า b มาก

การทำงานของรีเลย์และวงจรชดเชยความร้อนแสดงอยู่ในรูปข้างล่าง ส่วนให้กำลังของวงจรประกอบด้วยหม้อแปลงซึ่งแปลงไฟจาก 220 V ลงมาเป็น 0 - 110 V แล้วแต่จะต้องการ จากนั้นปรับเป็นไฟฟ้า DC ด้วยไดโอด 4 ตัว เมื่อรีเลย์เปิด อิเล็กโทรคทางด้านบนจะต่อกับวงจร กระแสจะไหลผ่านหลอด A ผ่านชดเชยความร้อนเต็มที่ เมื่อรีเลย์ปิด อิเล็กโทรคทางด้านล่างจะสัมผัสกับวงจร วงจรทางด้าน A จะไม่มีกระแสไหลผ่าน แต่เพื่อ



รูป 3.3 วงจรจ่ายกระแสให้ความร้อน

ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสมากเกินไป (จาก $I \rightarrow 0 \rightarrow I$) ขณะที่รีเลย์ปิดเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป เราต่อความต้านทาน R เข้ากับวงจรด้านล่าง เพื่อให้กระแสส่วนน้อยผ่านเข้าชดเชยไต่บ้าง อุณหภูมิของผลึกจึงจะไม่ลดลงเร็วเกินไป

ความต้านทานของชดเชยที่ใช้ประมาณ 200 โอห์ม ส่วน R ที่ใช้มีค่า 100 ถึง 200 โอห์ม (อาจเลือกค่าอื่นก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ดังนั้นเมื่อรีเลย์เปิด กระแสผ่านชดเชยความร้อนจะลดลง 33 % ถึง 50 %)



แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่ายกระแสเข้าชดเชยความร้อนเกี่ยวกับการกระเพื่อมของ อุณหภูมิที่ผลึก แรงเคลื่อนนี้อยู่ในช่วง 0 - 110 โวลต์ ถ้าแรงเคลื่อนน้อยเกินไปอุณหภูมิ ที่ผลึกอาจไม่สูงถึงเท่าที่ต้องการ แต่ตามากเกินไป การกระเพื่อมของอุณหภูมิจะมาก เพราะ ขณะที่รีเลย์ตัดและต่อ กำลังงานไฟฟ้าซึ่งให้ความร้อนจะเปลี่ยนแปลงมาก จะต้องใช้เวลานาน กว่าอุณหภูมิจะโน้มลงมาถึงจุดที่ต้องการ เพื่อแก้ไขเราจะต้องแต่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เหมาะสม พบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหมาะสม (V) เขียนได้เป็น

$$V = c(t - t_0) \quad (3.9)$$

โดย t_0 เป็นอุณหภูมิห้อง
 t เป็นอุณหภูมิของผลึกที่ต้องการควบคุม
 c เป็นค่าคงที่

ตัวอย่างค่า c ของเครื่องมือชุดหนึ่งคือ 0.813 นั่นคือ

$$V = 0.813(t - t_0) \quad (3.10)$$

โดยปกติค่า V ที่ใช้ในการทดลองไม่จำเป็นจะเท่ากับที่ได้จากสมการข้างบน อาจสูง กว่าเล็กน้อยก็ได้

ในเชิงปฏิบัติ สมมติว่าเราต้องการควบคุมอุณหภูมิที่ผลึกให้เท่ากับ 80°C ขณะที่ อุณหภูมิของห้องเท่ากับ 30°C แรงเคลื่อนไฟฟ้าสำหรับชดเชยความร้อนควรจะเป็น

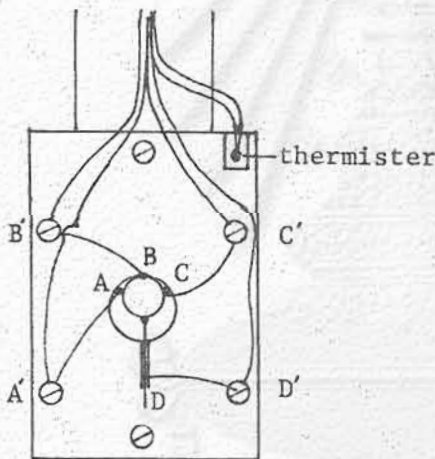
$$\begin{aligned} V &= 0.813(80 - 30) \\ &= 40.6 \text{ โวลต์} \end{aligned}$$

ขณะที่ห้องเครื่องยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่ เพื่อความรวดเร็วตอนแรกเราใช้ V มาก ๆ เช่น $V = 70$ โวลต์ อุณหภูมิของห้องเครื่องจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 80°C รีเลย์จะ

เริ่มตัดกระแสไหลลง ที่จุดนี้เราลดแรงเคลื่อนไฟฟ้าลงเหลือ 40.6 โวลต์ หรือมากกว่าเล็กน้อย (เช่น 41 โวลต์) อุณหภูมิของผลึกจะแกว่งไปมารอบ ๆ 80°C สักพักใหญ่ ๆ จากนั้นจะคงที่อยู่ประมาณ 80°C เรื่อยไปตามต้องการ

3.3 แผ่นยึดผลึก (Sample Holder)

ในการทดลอง แผ่นยึดผลึกทำไว้หลายแบบหลายขนาดแล้วแต่ผลึกที่ใช้ ตัวอย่างเช่น แบบซึ่งแสดงในรูป 3.4 เป็นแผ่นแบคเคลไรท์ขนาด 4.9 ซม.^2 หนาประมาณ 0.6 ซม. มีรูสวมนอตยึดติดกับปลายแกน K (ดูรูป 3.1) ด้านบนเซาะเป็นร่องสำหรับวาง thermistor หรือ thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิ ตรงกลางแผ่นเซาะเป็นหลุมกลม



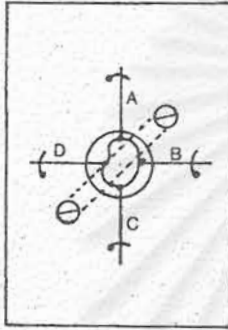
รูป 3.4 ตัวอย่างแผ่นยึดผลึก

ขนาดใหญ่กว่าผลึกเล็กน้อยและมีความลึกเท่ากับผลึกพอดี ผังโลหะกลมยาวเล็ก ๆ ไว้ที่ขอบวงกลม เป็น 3 จุด ตามรูปคือ A, B, C จากจุดทั้งสามมีสายไฟโลหะเล็ก ๆ ต่อกันไปถึงนอต A', B', C' และต่อกับสายไฟสู่ด้านบน ข้างล่างของหลุมกลมเซาะเป็นร่องยาว ผังด้วยโลหะยาว D ขนาดกับร่องนี้ แต่ไม่ค้ำน้ำหนักโลหะพอเลื่อนขึ้นลงได้

เพื่อทำสัมผัสทางไฟฟ้าที่ดี เราใช้ Ga-In liquid conductor alloy (Ga 75 %, In 25 % โดยน้ำหนัก) อะลอยนี้จะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อลดยุณหภูมิจนถึงจุด A, B, C และปลายโลหะยาว D วางผลึกลงในหลุมกลม เลื่อน D ยันผลึกให้สัมผัส

A, B, C จะได้จุดสัมผัสทางไฟฟ้า A, B, C, D ตามต้องการ

แผนยึกผลึกคานบนใช้ได้ดีสำหรับผลึกที่มีรูปร่างกลม ขอบของผลึกจะสามารถสัมผัสจุด A, B, C ได้ดี ถ้าผลึกแบนมีรูปร่างอย่างอื่น อาจสัมผัสจุดทั้งสามไม่สนิท ในกรณีนี้ เราอาจเจาะแผ่นแบคเคลไรท์เป็นร่องแฉกสี่เหลี่ยม ดังรูป ผังโลหะยาว A, B, C, D



รูป 3.5 วิธีทำสัมผัสทางไฟฟ้าที่ได้อีกแบบหนึ่ง

ลงในร่องทั้งสี่ ปลายโลหะทำด้วย liquid conductor วางผลึกลงในร่องกลมจากนั้นดันโลหะยาวทั้งสี่เข้าสัมผัสผลึกดังในรูป เพื่อยึดโลหะ A, B, C, D ใหแน่น เราผังโลหะยาวเล็กซึ่งทำด้วยโลหะซึ่งงอได้ง่าย จากนั้นงอโลหะนี้ให้กดโลหะ A, B, C, D ใหติดแน่นกับร่อง ในกรณีนี้ก็กลัวว่าผลึกจะหลุดออกจากร่อง ตัดแผ่นไมกาทบาง ๆ ทาบผลึกจากคานบนโดยยึดแผ่นนี้ไว้ด้วยนอตสองตัว แผ่นไมกานี้จะกกดผลึกให้ติดกับแบคเคลไรท์ตลอดไป

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โลหะจะขยายตัวได้ดีกว่าแบคเคลไรท์ จะเกิดแรงอัดจากโลหะยาวทั้งสี่ต่อผลึก แต่เนื่องจากโลหะทั้งสี่ไม่ได้ติดกับแผ่นแบคเคลไรท์แน่นจริง ๆ ลวดที่รัดจากคานบนทำให้โลหะยาว A, B, C, D เลื่อนได้อย่างผิด ๆ จึงไม่ทำให้เกิดแรงอัดต่อผลึกจนเกิดอันตรายแต่อย่างใด

โลหะทุกชนิดที่เข้ากับแผนยึกผลึกจะต้องไม่ใช่สารแม่เหล็ก มิฉะนั้นจะใช้ทดลองในสนามแม่เหล็กความเข้มสูงไม่ได้

ในการวิจัยพบว่าผลึกที่โซมีความเปราะมาก ถึงแม้จะใช้ความระมัดระวังในการวางผลึก บางครั้งผลึกก็อาจแตกหักได้ก่อนที่จะได้จุดสัมผัสทางไฟฟ้าที่ดี ทำให้การทดลองทำได้ด้วยความล่าช้า ในบางกรณี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลอง

ในการวิจัยได้ศึกษาปรากฏการณ์ขนส่งของผลึก 4 ผลึก ผลึกทั้งสี่มีสูตรทางเคมีดังนี้

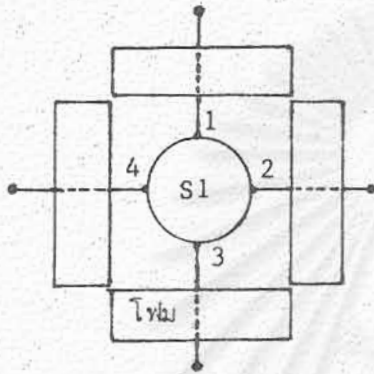
- 1) $\text{Cu}_{0.25}\text{Ag}_{0.75}\text{GaSeTe}$
- 2) $\text{Cu}_{0.5}\text{Ag}_{0.5}\text{InTe}_2$
- 3) $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Te}_2$
- 4) $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_2$

วิธีการสังเคราะห์ผลึกเหล่านี้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากการวิจัยเป็นงานเริ่มแรกเกี่ยวกับการศึกษาผลึกประเภทสารกึ่งตัวนำแบบซาล์โคไพไรท์นี้ เราจึงเริ่มต้นการทำงานที่ละเอียดขั้นตอนโดยเริ่มศึกษาถึง

- ก) จุดสัมผัสทางไฟฟ้าที่ทำขึ้นว่าใช้ได้หรือไม่ จะทำให้เกิดผลผิดพลาดหรือไม่
 - ข) เทคนิคของ แวน เดอ พาว ใช้ได้กับผลึกแบบนี้หรือไม่ (เพราะบางตัวมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงมาก)
 - ค) สภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) และสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ของแต่ละผลึกเป็นอย่างไร
 - ง) อธิบายผลลัพธ์เท่าที่ทำได้
- ผลการวิจัยของแต่ละผลึกแสดงอยู่ข้างล่าง

4.1 การทดลองของผลึก S1 ($\text{Cu}_{0.25}\text{Ag}_{0.75}$) GaSeTe

สำหรับผลึก S1 ได้ทำการทดลองเริ่มแรกโดยวางผลึกระหว่างโพลี 4 เหลี่ยม ใช้เข็มหมุดปลายแหลมซึ่งปลายค้ำยันนำแหลวกที่จุด 4 จุดตั้งรูป ลองวัด R_{ij} โดยใช้ digital ohmmeter ซึ่งมีความต้านทานภายในสูงมาก ผลการทดลองแสดงอยู่ในตาราง



รูป 4.1 การทดลองวัดค่า ρ ของผลึก S1

4.1 โดย R_{ij} หมายถึงความต้านทานที่วัดได้เมื่อขั้วบวกและขั้วลบของเครื่องมืออยู่ที่ขั้ว i และ j ตามลำดับ

ตาราง 4.1

ค่า R_{ij} ของผลึก S1

R_{ij}	กΩ	R_{ji}	กΩ
R_{12}	3.39	R_{21}	2.91
R_{13}	2.12	R_{31}	2.53
R_{14}	2.19	R_{41}	2.45
R_{23}	1.93	R_{32}	2.57
R_{24}	2.74	R_{42}	2.61
R_{34}	2.20	R_{43}	1.50

ปกติถ้าจุดสัมผัสไฟฟ้าที่

$$R_{ij} = R_{ji} \quad (4.1)$$

จากผลข้างบนแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างเล็กน้อยระหว่าง R ทั้งสอง เช่น

$$R_{12} = 2.39 \text{ k}\Omega, \quad R_{21} = 2.91 \text{ k}\Omega$$

$$\Delta R = 0.52 \text{ k}\Omega$$

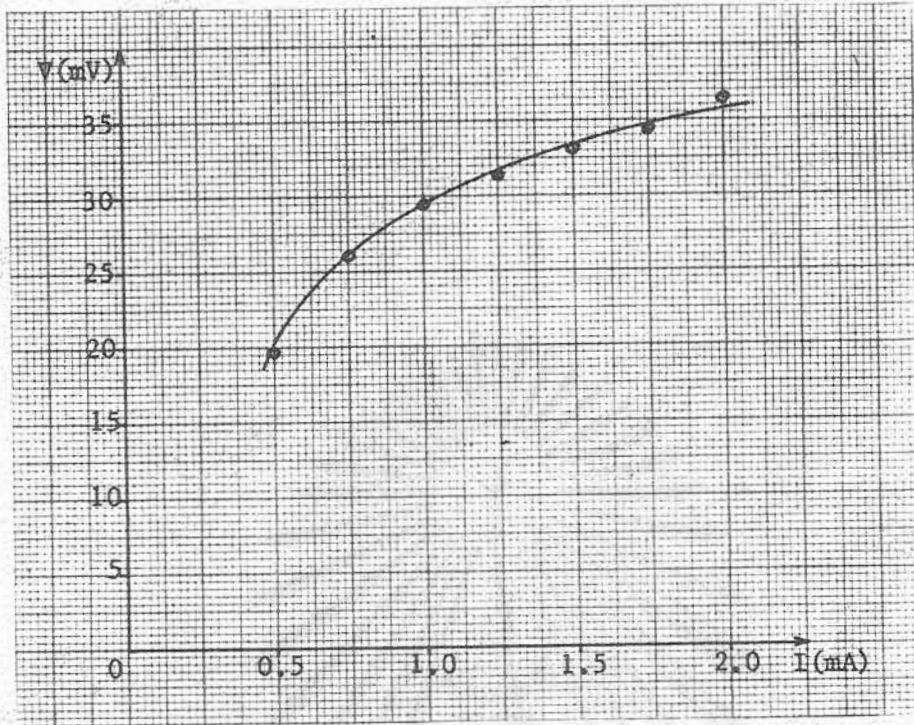
ซึ่งมีค่าประมาณ 20 % แสดงว่าเกิด schottky barrier ขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณจุดสัมผัส อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่มากนัก ถ้าไม่มีข้อบกพร่องอย่างอื่นเราอาจหา R_{abcd} ได้ อย่างถูกต้อง ดังจะได้อธิบายต่อไป

ตัวอย่างผลการทดลองของผลึกนี้แสดงในตารางข้างล่างและในรูป 4.2

ตาราง 4.2

ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{34} และ V_{12} ของผลึก S1

I_{34} (mA)	V_{12} (mV)
0.50	19.6
0.75	26.1
1.00	29.4
1.25	31.4
1.50	33.2
1.75	34.4
2.00	36.5



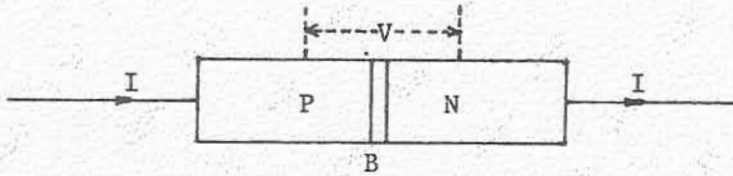
รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง I และ V ของผลึก S1

ข้อมูลข้างบนแสดงว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ตามกฎนี้กราฟจะต้องเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด (origin) กราฟของ I และ V สำหรับการวัดโดยใช้ขั้วอื่น ๆ ก็แสดงลักษณะคล้าย ๆ กัน สาเหตุไม่น่าจะมาจากจุดสัมผัสทางไฟฟ้า เพราะจากการพิจารณา R_{ij} ในตาราง 4.1 ความหนาพร่องของจุดสัมผัสไม่ควรทำให้เกิดความผิดพลาดถึงขนาดนี้

ขอให้เราพิจารณา P-N junction ในรูป 4.3 เมื่อมีความต่างศักย์คร่อมรอยต่อ V จะมีกระแสไหลผ่าน

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

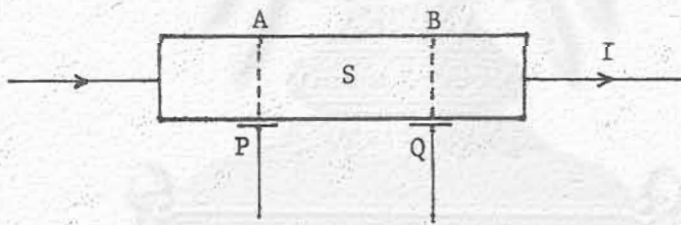
โดย I_0 เป็นกระแสกลับที่ซึ่งเรียกว่า minority current, e คือค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน และ k เป็น Boltzmann's constant



รูป 4.3 P-N junction

ในสมการนี้ I และ V เป็นบวกในทิศของ forward bias

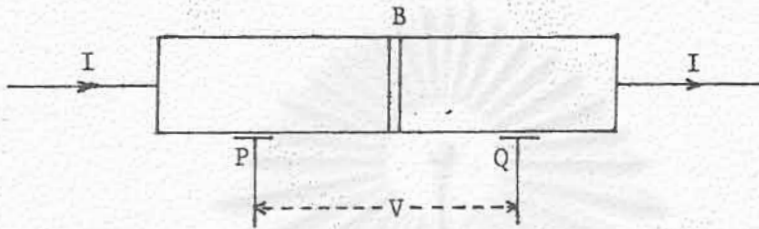
ในการวัดศักย์ V_{AB} ของผลึกแบบในรูป 4.4 เมื่อเราป้ายตัวนำแหลวที่ P และ Q และวัดความต่างศักย์ระหว่าง 2 จุดนี้โดยใช้ potentiometer ตัวนำแหลว In-Ga อาจทำให้เกิด schottky barrier ซึ่งมีลักษณะคล้าย ๆ รอยต่อหรือ barrier ในรูป 4.3 ถ้ามีกระแสผ่าน barrier ทั้งสองจะทำให้เกิดความต่างศักย์คร่อม barrier ซึ่งมีลักษณะ



รูป 4.4 การวัดความต่างศักย์ที่จุดสองจุดของผลึก

คล้าย ๆ ตัวแสดงในสมการ (4.2) แต่การวัดด้วย potentiometer และเราใช้ null detector ดังนั้นขณะที่เครื่องมือนี้สมดุลจะไม่มีกระแสผ่าน barrier นั้น ตามสมการ (4.2) จะไม่มีความต่างศักย์คร่อม barrier ซึ่งหมายความว่าเราวัด V_{AB} ได้ถูกต้อง จึงเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะมี barrier เกิดขึ้นที่บริเวณจุดสัมผัส การวัดก็ยังคงไม่ผิดพลาด

อย่างไรก็ตามถ้ามี barrier เกิดขึ้นภายในเนื้อสารดังในรูป 4.5 ความต่างศักย์ที่วัดได้บางส่วนจะมาจากความต่างศักย์คร่อม barrier นี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง I และ V



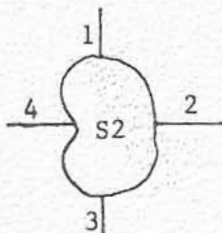
รูป 4.5 แสดง crystal defect ภายในผลึก

จะเป็นดังในรูป 4.2 ดังนั้นเป็นไปได้ว่าผลึก S1 ที่ใช้ควมโครงสร้างที่ไม่ดี กล่าวคือเนื้อสารไม่สม่ำเสมอ อาจมี void หรือ grain boundary อยู่ภายใน การวัดจึงได้ผลดังแสดงในรูป พบว่าขณะที่บางส่วนของผลึกนี้แตกออก ใคสังเกตเห็นรูพรุนอยู่ภายในด้วย ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างภายในไม่สม่ำเสมอ

สำหรับผลึก S1 นี้จึงไม่สามารถวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้

4.2 ผลการทดลองของผลึก S2

ผลึก S2 มีลักษณะเป็นแผ่นแบนรูปรีหนา 0.125 ซม. ใคทำจุดสัมผัส 4 จุด ดังแสดงในรูป 4.6 จากนั้นใคใช้ digital ohmmeter วัดความต้านทาน R_{ij} ผลลัพธ์ในหน่วยกิโลโอห์มแสดงในตาราง 4.3



รูป 4.6 ผลึก S2 และขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ

ตาราง 4.3

R_{ij} ของผลึก S2 ในหน่วยกิโลโอม

R_{12}	0.205	R_{21}	0.211
R_{13}	0.387	R_{31}	0.406
R_{14}	0.332	R_{41}	0.336
R_{23}	0.272	R_{32}	0.307
R_{24}	0.271	R_{42}	0.251
R_{34}	0.393	R_{43}	0.425

ได้ทำการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C , 39°C, 56°C และ 78°C ตัวอย่างผลการทดลองที่อุณหภูมิ 28°C แสดงในตาราง 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.4

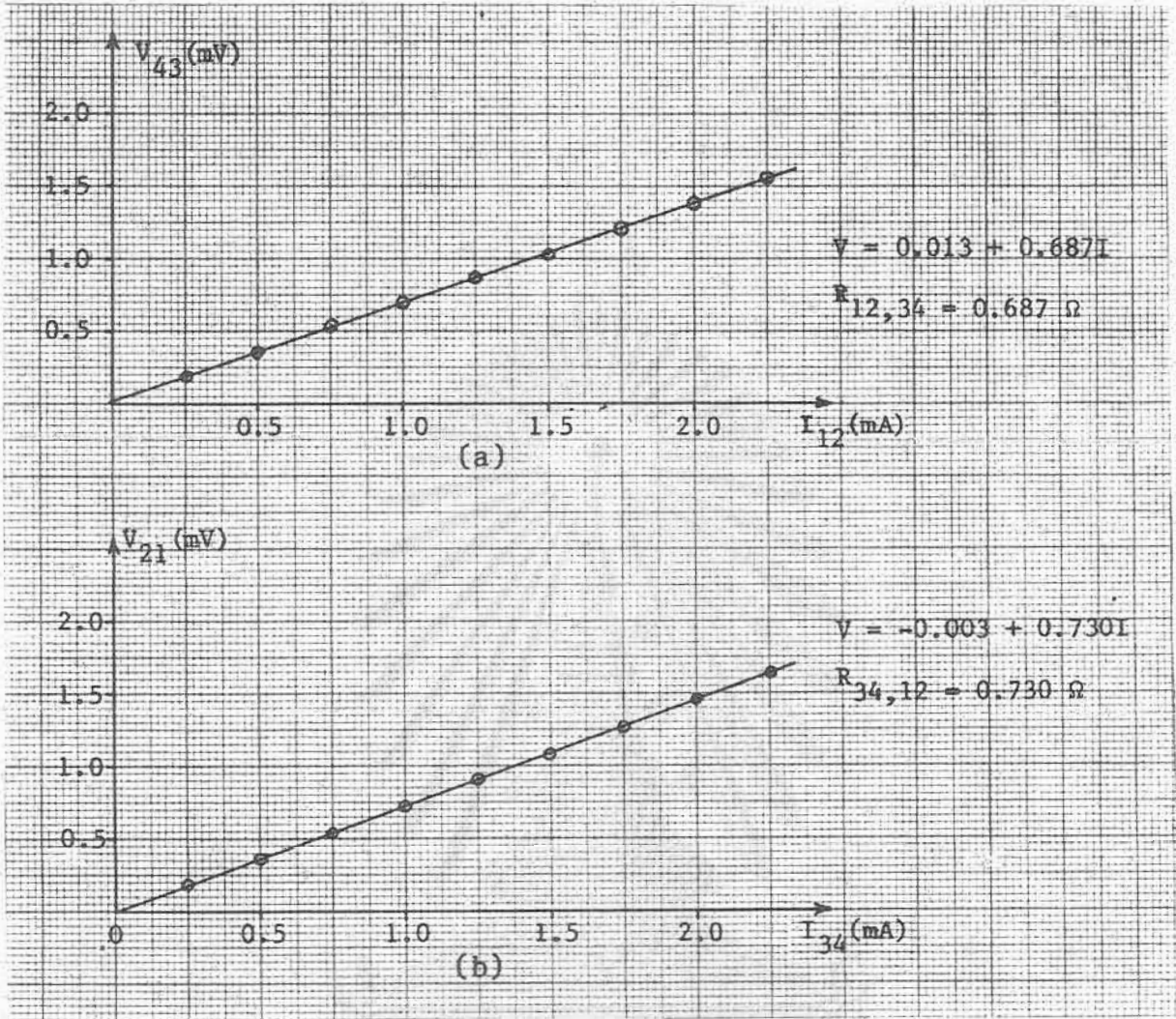
ผลการทดลองวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C

I (mA)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)
0.25	0.185	0.182	0.330	0.340
0.50	0.356	0.365	0.644	0.645
0.75	0.528	0.544	0.947	0.978
1.00	0.700	0.725	1.257	1.333
1.25	0.871	0.908	1.572	1.681
1.50	1.044	1.092	1.891	2.090
1.75	1.218	1.272	2.231	2.252
2.00	1.386	1.459	2.559	2.938
2.25	1.557	1.640	2.913	3.375

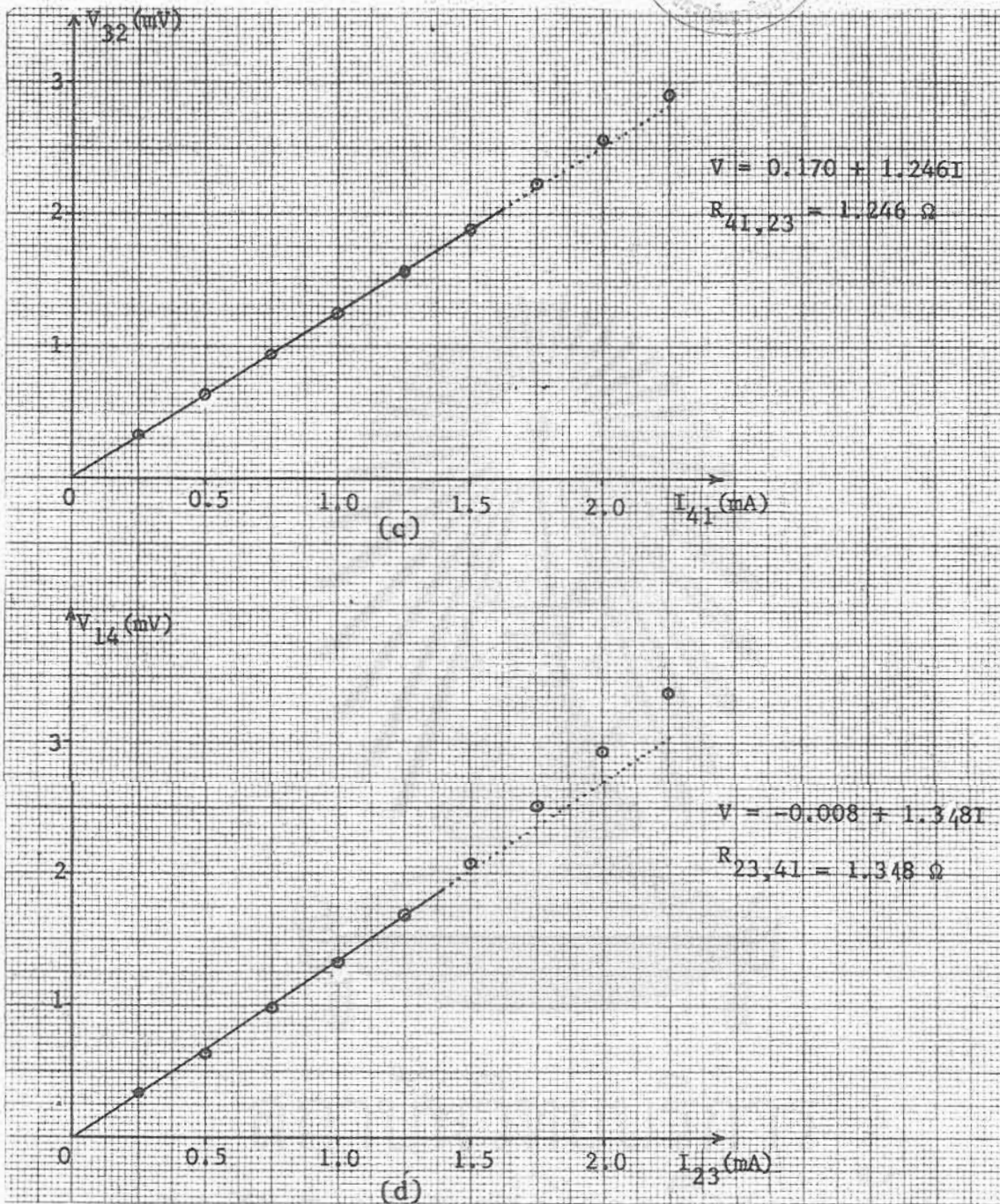
ในตารางข้างบน $V_{ab}(cd)$ หมายถึง V_{ab} เมื่อกระแสผ่านขั้ว c ไป d จากกราฟ
 ในรูป 4.7 เราอาจหา $R_{ab,cd}$ ได้โดยการหาความชัน $\Delta V/\Delta I$ ในรูป (4.7 a,b)
 เราได้ความสัมพันธ์ V, I เป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด ซึ่งสอดคล้องกับกฎของโอห์ม
 แต่ในรูป (4.7 c, d) พบว่าเมื่อ I และ V มาก ๆ เส้นกราฟจะเงยขึ้น เรา
 อาจเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$I = kV - cV^2$$

โดย k และ c เป็นค่าคงที่ และ $c \ll k$ จะเห็นว่าในกราฟเทอม V^2 เริ่ม
 เข้ามาเกี่ยวข้อง และความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ V เริ่มแตกต่างไปจากกฎของโอห์มเล็กน้อย



รูป 4.7 การวัด $R_{12,34}$ (a) และ $R_{34,12}$ (b) ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C



รูป 4.7 การวัด $R_{41,23}$ (c) และ $R_{23,41}$ (d) ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 28°C

ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นกับสารที่มีความต้านทานสูงมาก ๆ แต่ในการหาค่า R นั้น เราใช้ช่วงที่ I และ V แปรผันตรงกันคือช่วงที่ I และ V น้อย ๆ เท่านั้น (ในตาราง 4.4 หมายถึงข้อมูลเหนือเส้นประในคอลัมน์ที่ 3 และ 4) จากรูปพบว่าถ้า $V < 2$ volts กราฟระหว่าง I กับ V จะเป็นเส้นตรง ค่า R ต่าง ๆ ที่ได้จาก least-square fit แสดงอยู่ข้างล่าง

$$R_{23,41} = 1.328 \text{ } \Omega \quad , \quad R_{41,23} = 1.246 \text{ } \Omega \quad (4.3 \text{ a,b})$$

$$R_{12,34} = 0.687 \text{ } \Omega \quad , \quad R_{34,12} = 0.730 \text{ } \Omega \quad (4.3 \text{ c,d})$$

จากผลการทดลองเราอาจวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดนี้จากสมการ (1.52) เราได้ว่า

$$\exp(-\pi d R_{ab,cd}/\rho) + \exp(-\pi d R_{bc,da}/\rho) = 1 \quad (4.4)$$

ในรูป (1.2) เมื่อย้าย R, S มาทางซ้ายของ P โดยอาศัยสมการ (1.7) เราอาจพิสูจน์ได้ว่า

$$R_{ab,cd} = R_{ba,dc} \quad (4.5)$$

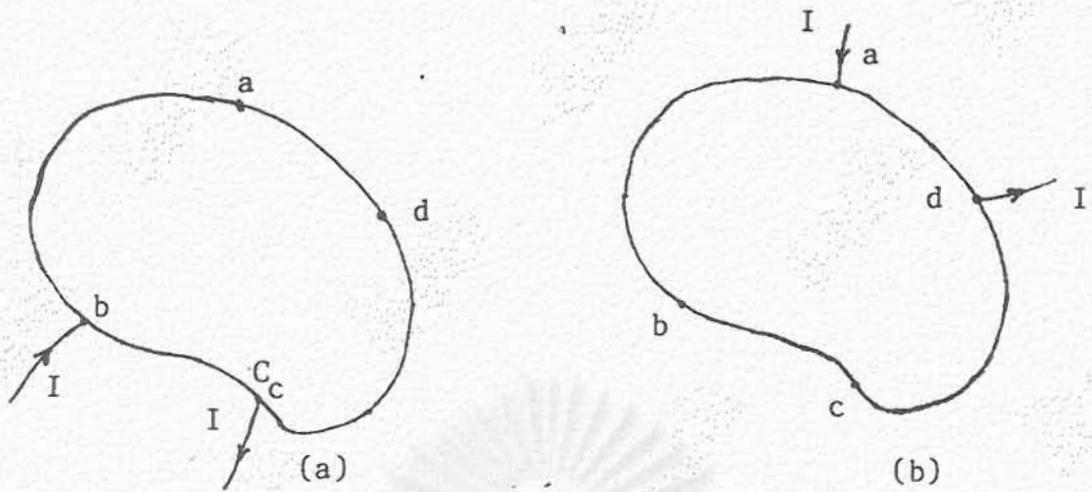
$$\text{แต่ } \exp(-\pi d R_{ba,dc}/\rho) + \exp(-\pi d R_{ad,cb}/\rho) = 1 \quad (4.6)$$

แทน (4.5) ลงใน (4.6)

$$\exp(-\pi d R_{ab,cd}/\rho) + \exp(-\pi d R_{ad,cb}/\rho) = 1 \quad (4.7)$$

เทียบ (4.4) กับ (4.7) เราได้

$$R_{bc,da} = R_{ad,cb} \quad (4.8)$$



รูป 4.8 กระแสผ่านเข้าผลึกทางขั้วที่ตรงข้ามกัน

ตามรูป 4.8 หมายความว่าในกรณีที่เราผ่านกระแส I เข้าที่ b และออกที่ c (รูป a) กับผ่านกระแส I (ขนาดเดียวกัน) เข้าที่ a และออกที่ d (รูป b) เราจะวัดความต่างศักย์ V_{ad} และ V_{bc} ได้เท่ากัน ตามรูป

$$V_{ad} = V_{bc}$$

และโดยทั่วไปจากสมการ (4.5) และ (4.8) เราอาจพิสูจน์ได้ว่า

$$R_{bc,da} = R_{cb,ad} = R_{ad,cb} = R_{da,bc} \quad (4.9)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$R_{23,41} = R_{41,23} = R_{12,34} = R_{34,12} \quad (4.10)$$

แต่จากสมการ (4.3) พบว่าค่า R ทั้งสองคู่ที่ได้จากการทดลองต่างกันประมาณ 5 % และ 6 % ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนนี้อาจมาจากขนาดของสัมผัสทางไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่เป็นจุดอย่างทีกล่าวไว้ในทฤษฎี และความไม่สมมาตรบางลักษณะของผลึกที่ใช้

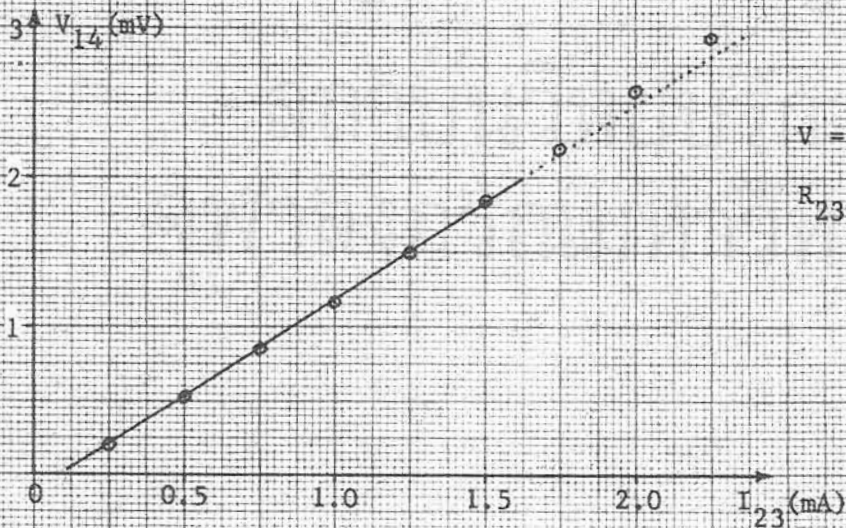
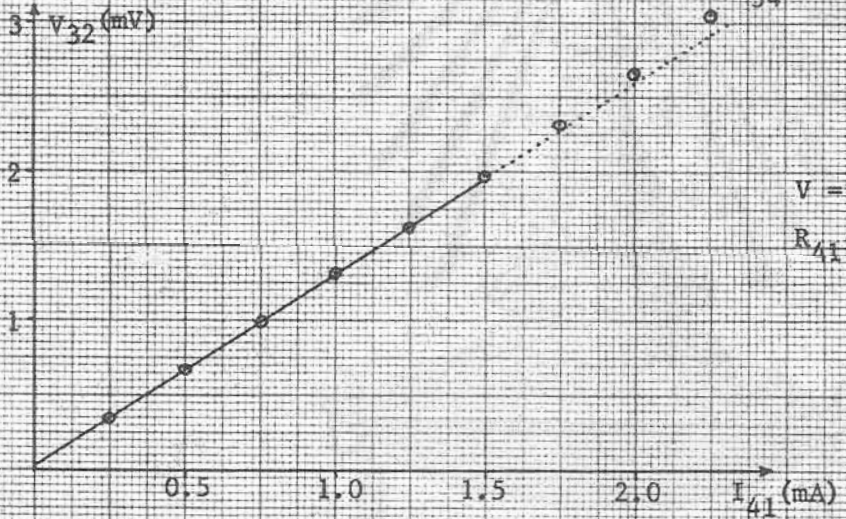
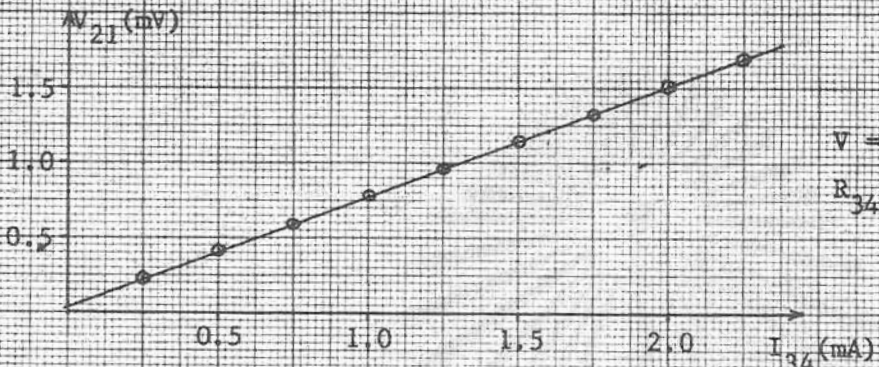
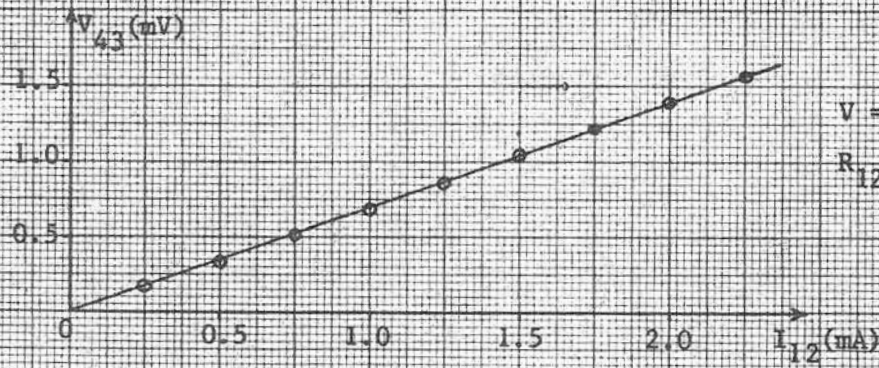
การทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือที่อุณหภูมิ 39°C , 56°C และ 78°C
แสดงอยู่ในตารางและรูปข้างล่าง

ตาราง 4.5

ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 39°C

I (mA)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)
0.25	0.166	0.230	0.351	0.201
0.50	0.338	0.417	0.675	0.530
0.75	0.517	0.599	0.999	0.856
1.00	0.693	0.782	1.320	1.171
1.25	0.870	0.965	1.634	1.500
1.50	1.049	1.150	1.976	1.850
1.75	1.220	1.333	2.317	2.200
2.00	1.396	1.518	2.670	2.578
2.25	1.565	1.704	3.062	2.938

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.9

การวัด ρ ของผลึก

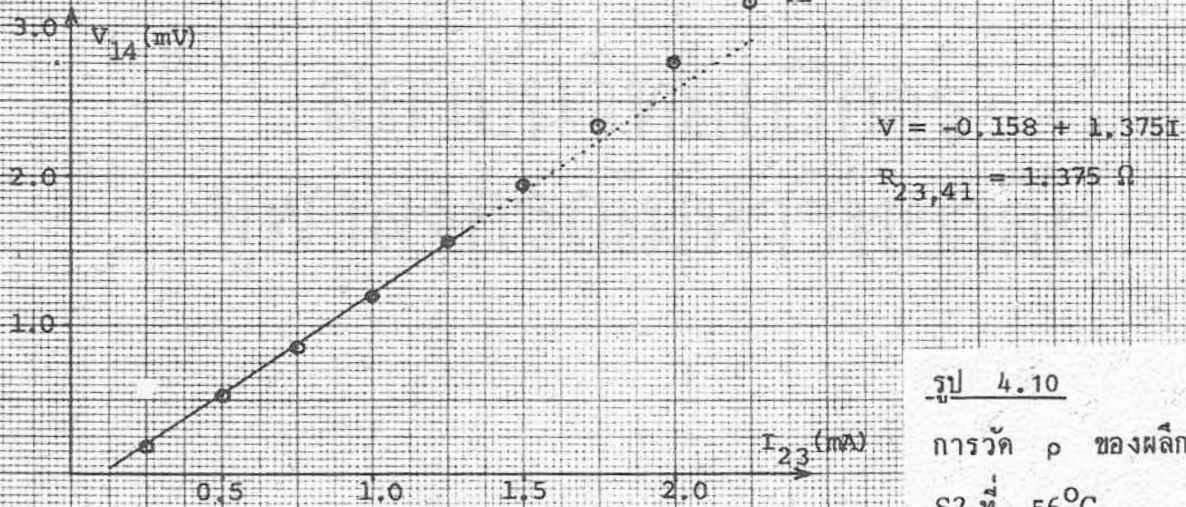
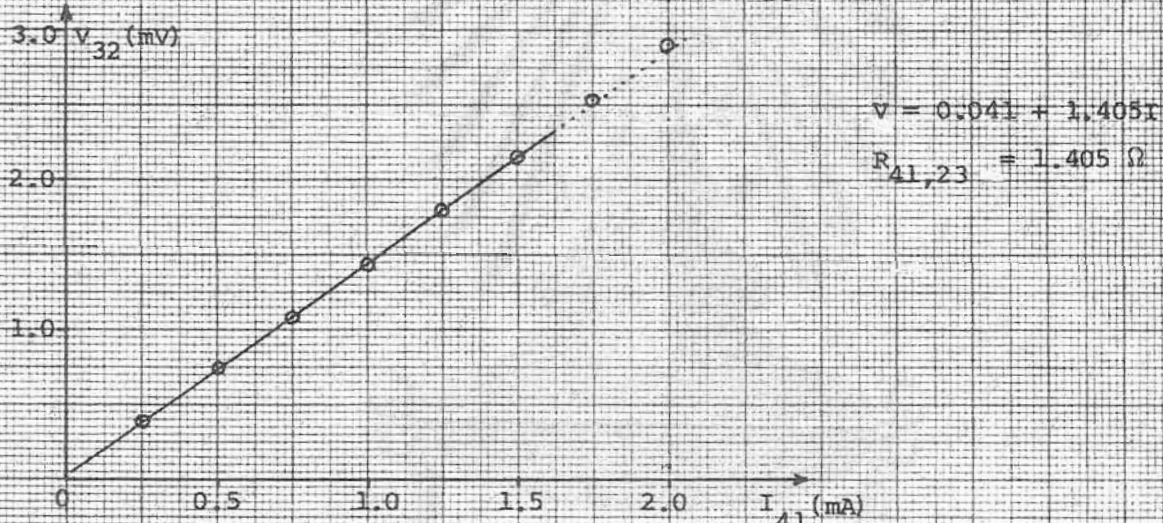
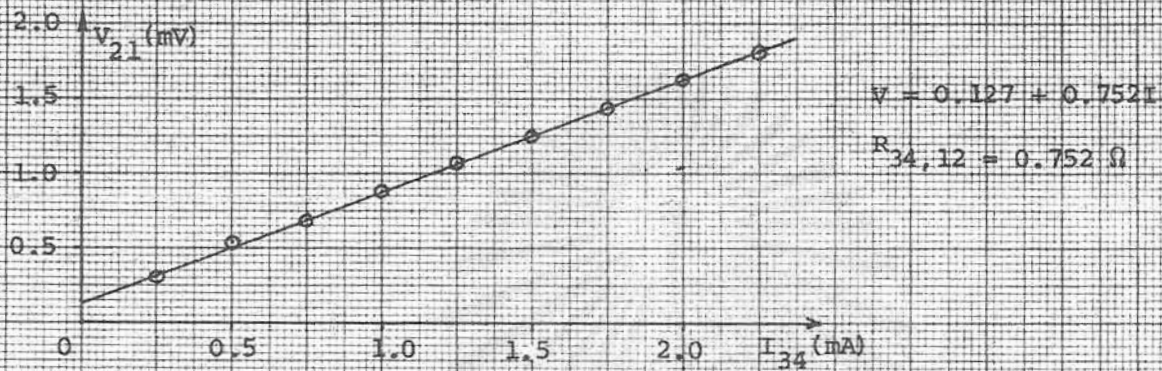
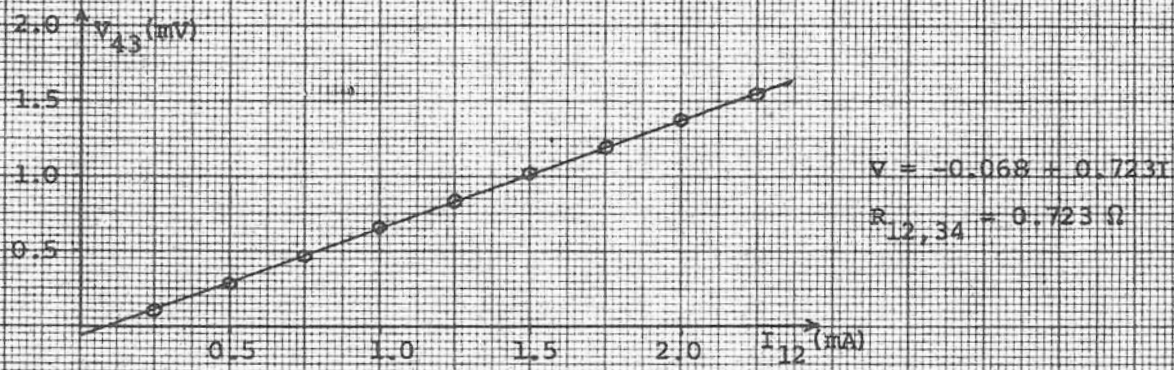
S2 ที่ 39°C

ตาราง 4.6

ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่ 56°C

I (mA)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)
0.25	0.109	0.310	0.390	0.190
0.50	0.286	0.504	0.750	0.535
0.75	0.475	0.688	1.093	0.861
1.00	0.659	0.880	1.435	1.209
1.25	0.840	1.064	1.804	1.572
1.50	1.027	1.255	2.161	1.949
1.75	1.200	1.444	2.535	2.349
2.00	1.375	1.629	2.910	2.757
2.25	1.550	1.818	3.343	3.170

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.10

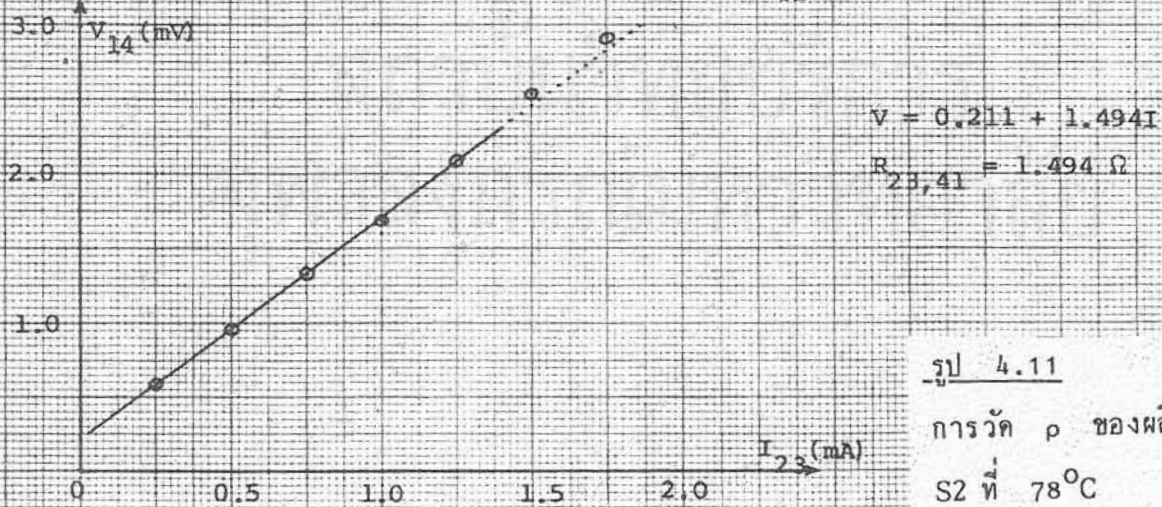
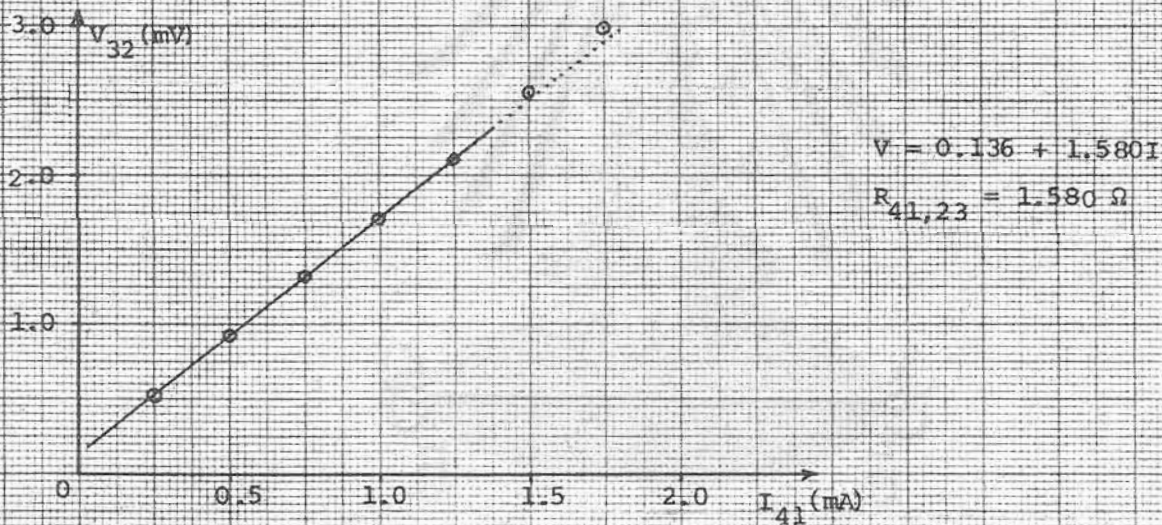
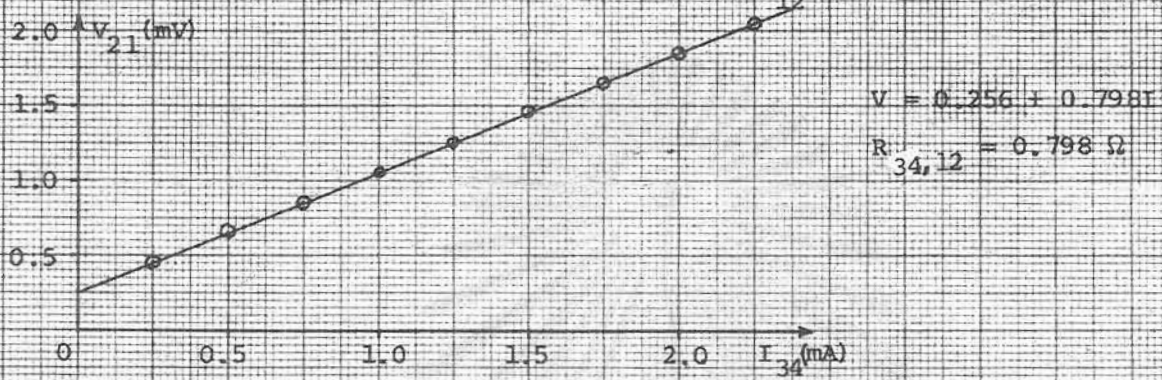
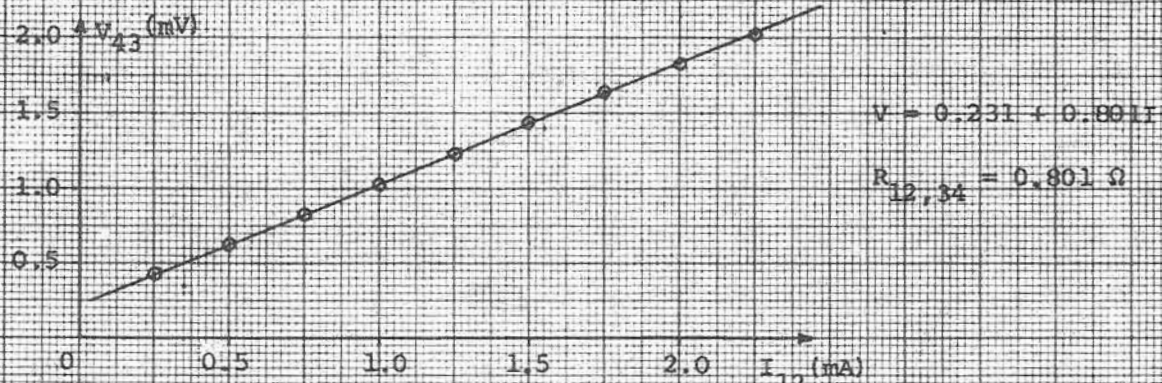
การวัด ρ ของผลึกS2 ที่ 56°C

ตาราง 4.7

ผลการวัดค่า ρ ของผลึก S2 ที่อุณหภูมิ 78°C

I (mV)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)
0.25	0.430	0.456	0.529	0.584
0.50	0.633	0.656	0.928	0.963
0.75	0.826	0.851	1.323	1.328
1.00	1.030	1.054	1.708	1.695
1.25	1.231	1.253	2.116	2.085
1.50	1.438	1.458	2.555	2.504
1.75	1.645	1.653	2.995	2.919
2.00	1.834	1.851	3.460	3.381
2.25	2.022	2.049	3.925	3.896

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.11

การวัด ρ ของผลึกS2 ที่ 78°C

ค่า $R_{ab,cd}$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สรุปรวมในตาราง 4.8 จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น $R_{12,34}$ ควรจะเท่ากับ $R_{34,12}$ และ $R_{23,41}$ ควรจะเท่ากับ $R_{41,23}$ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 28°C ความแตกต่างของ R ทั้งสองนี้ค่อนข้างมาก (5.6 %) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแตกต่างที่ได้น้อยลงมาก

ตาราง 4.8

ค่า $R_{ab,cd}$ ต่าง ๆ และค่า ρ ของผลึก S2 ที่คำนวณได้

อุณหภูมิ $R_{ab,cd}$	28°C	39°C	56°C	78°C
$R_{12,34}$ (Ω)	0.687	0.702	0.723	0.801
$R_{34,12}$ (Ω)	0.730	0.735	0.752	0.798
$R_{23,41}$ (Ω)	1.348	1.314	1.375	1.494
$R_{41,23}$ (Ω)	1.246	1.295	1.405	1.582
ρ_1 ($\Omega\text{-cm}$)	0.555	0.554	0.574	0.629
ρ_2 ($\Omega\text{-cm}$)	0.545	0.560	0.591	0.648
$\bar{\rho}$ ($\Omega\text{-cm}$)	0.55	0.56	0.58	0.64

จาก $R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ เราอาจหาค่า ρ ได้จากสมการ

$$\exp(-\pi d R_{12,34} / \rho) + \exp(-\pi d R_{23,41} / \rho) = 1$$

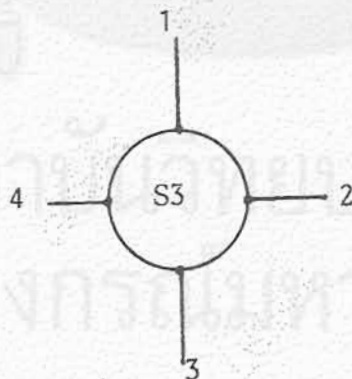
ในที่นี้ $d = 0.125$ ซม. จากเครื่องคำนวณค่า ρ ที่ได้แสดงโดย ρ_1 ตั้งในตาราง และจาก $R_{34,12}$ และ $R_{41,23}$ เราอาจหา ρ ได้แบบเดียวกัน ในตารางข้างบนคือ ρ_2 ค่าเฉลี่ยของ ρ ทั้งสอง ($\bar{\rho}$) แสดงในช่องสุดท้าย (เลขนัยสำคัญ 2 ตำแหน่ง) จากผลการทดลองเราสรุปได้ว่าความต้านทานของผลึก S2 จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ในการวิจัยโดยใช้ผลึก S2 นี้ ได้พยายามวัดสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) โดยใช้กระแสผ่านจากขั้ว 1 ไป 3 และวัดการเปลี่ยนแปลงของ V_{42} เมื่อมีสนามแม่เหล็กผ่านตั้งฉากกับผลึก แต่จากการทดลองไม่พบว่าการเปลี่ยนแปลงของ V_{42} แต่ประการใด ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงถึง 0.34 เทสลาก็ตาม สรุปได้ว่าอาจเป็นเพราะ

- 1) R_H ของผลึกนี้มีค่าน้อยเกินไป
- 2) ค่าความต้านทานของผลึก และค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสทางไฟฟ้ามีค่าสูงจนทำให้ null detector ที่ใช้มีความไวไม่พอ

4.3 ผลการทดลองของผลึก S3

ผลึก S3 คือ $\text{Ag}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Te}_2$ มีลักษณะเป็นแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.606 ซม. ถึง 0.612 ซม. ความหนาเท่ากับ 0.100 ซม. จุดสัมผัสทางไฟฟ้าติดกับผลึกดังรูป 4.12 ได้วัด R_{ij} ของผลึกนี้โดย digital multimeter ผลลัพธ์แสดง



รูป 4.12 ผลึก S3 และจุดสัมผัสทางไฟฟ้าทั้งสิ้น

ในตาราง 4.9 ในหน่วยกิโลโอห์ม

ตาราง 4.9

R_{ij} ของผลึก S3 ในหน่วยกิโลโอห์ม

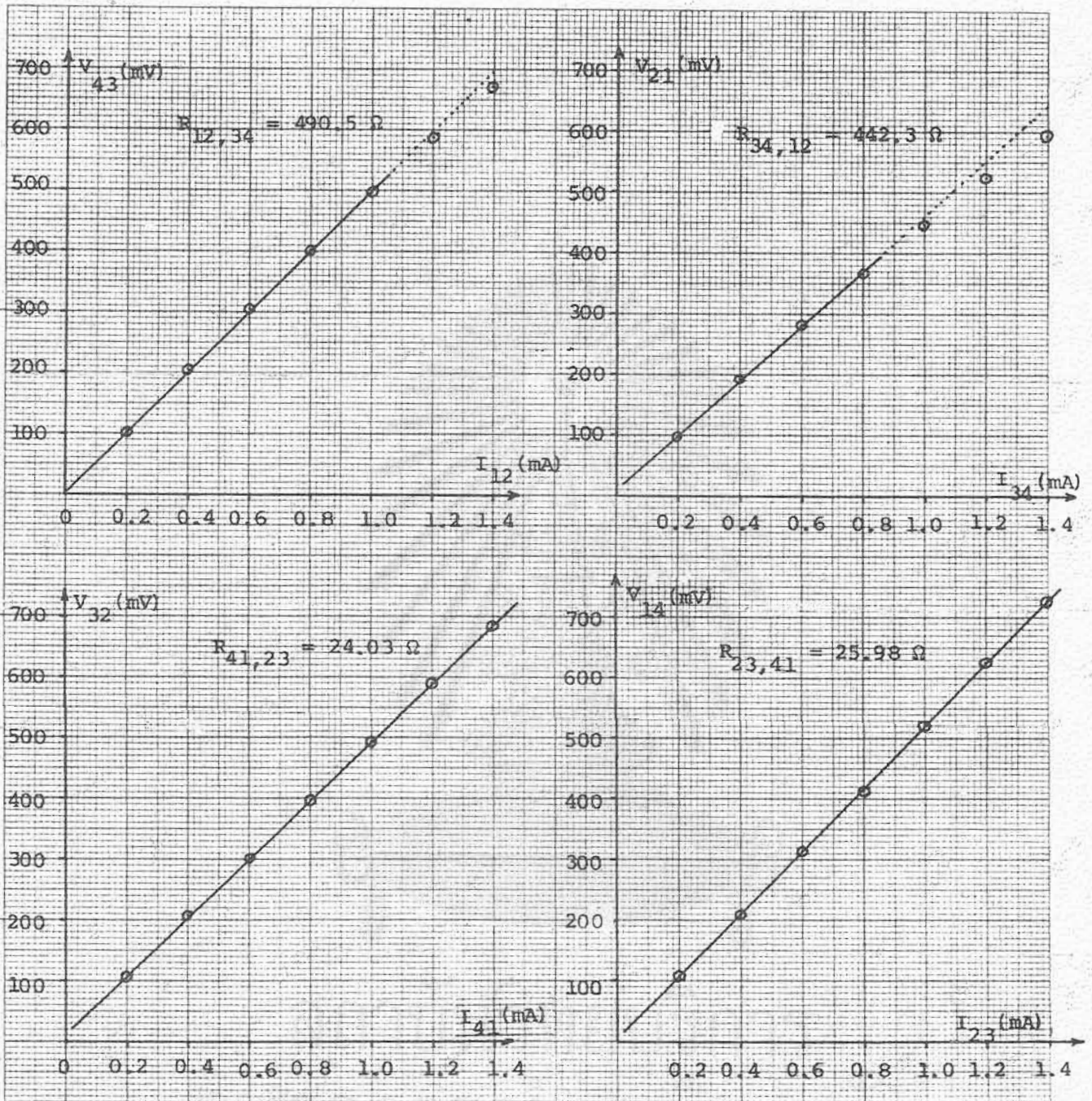
R_{12}	2.94	R_{21}	3.15
R_{13}	2.28	R_{31}	2.91
R_{14}	3.37	R_{41}	3.48
R_{23}	0.51	R_{32}	0.50
R_{24}	1.95	R_{42}	1.93
R_{34}	1.68	R_{43}	1.67

ได้ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 30°C 39°C 61°C และ 81°C ผลการทดลองแสดงอยู่ข้างล่าง

ตาราง 4.10

การวัด ρ ของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 30°C

I (mA)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)
0.20	104	99	5.3	5.3
0.40	206	193	10.4	10.5
0.60	306	281	15.1	15.7
0.80	401	365	19.8	20.7
1.00	497	447	24.6	26.2
1.20	588	524	29.5	31.3
1.40	672	595	34.3	36.4



รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง V และ I ต่าง ๆ ในการวัด ρ ของผลึก S3 ที่อุณหภูมิ 30°C

ช่องซ้ายมือสุดของตารางเป็นขนาดของกระแสที่ใช้ $V_{43}(12)$ หมายถึงความต่างศักย์ที่ขั้ว 4 และ 3 เมื่อกระแส I ผ่านเข้าที่ขั้ว 1 และออกขั้ว 2 ในช่องอื่น ๆ ก็มีความหมายทำนองเดียวกัน จากข้อมูลแต่ละช่อง เราอาจหา $R_{ab,cd}$ ได้ เช่นจาก $V_{43}(12)$ เราหา $R_{12,34}$ ได้ ผลลัพธ์แสดงอยู่ข้างล่าง

$$R_{12,34} = 490.5 \text{ }\Omega$$

$$R_{34,12} = 442.3 \text{ }\Omega$$

$$R_{41,23} = 24.03 \text{ }\Omega$$

$$R_{23,41} = 25.98 \text{ }\Omega$$

กราฟระหว่าง V , I ต่าง ๆ แสดงในรูป 4.13 อาจสังเกตได้ว่าในกรณี $V_{43}(12)$ และ $V_{21}(34)$ เมื่อกระแสความต่างศักย์จะสูง และเส้น V , I เมื่อ V มาก ๆ จะเบนขึ้นไม่ใช่เส้นตรง ปรากฏการณ์นี้คล้าย ๆ กับที่กล่าวในผลการทดลองของผลึก S_2 ทั้งนี้เนื่องจากสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกสูงมากนั่นเอง ดังนั้นในการคำนวณ $R_{12,34}$ และ $R_{34,12}$ เราจึงใช้ข้อมูลในช่วงที่เส้น V , I เป็นเส้นตรง หรือช่วงที่ I น้อย ๆ เท่านั้น ในตารางคือข้อมูลที่เหนือเส้นประขึ้นไป ส่วนสำหรับ $V_{14}(23)$ และ $V_{32}(41)$ นั้น V ที่ได้มีค่าน้อย จะได้กราฟเส้นตรงทั้งหมดดังแสดงในรูป

จากตาราง 4.10 พบว่า ที่กระแสเดียวกันค่า $V_{43}(12)$ และ $V_{12}(34)$ มีค่ามากกว่า $V_{14}(23)$ และ $V_{32}(41)$ มาก ในรูป 4.12 ถ้าผลึกเป็นวงกลมและจุดสัมผัสตั้งสี่ทางกันเท่า ๆ กัน ความแตกต่างนี้ไม่น่าจะเกิดขึ้น แต่ถ้าวัดข้อมูล R_{ij} ในตาราง 4.9 จะพบว่า R_{ij} ต่าง ๆ ไม่เท่ากัน $R_{23} \approx R_{32} \approx 0.50 \text{ k}\Omega$ มีค่าน้อยที่สุด ส่วน R_{14} และ R_{41} มีค่ามากที่สุด แสดงว่าจุดสัมผัสที่เราทำได้นั้นไม่มีความสมมาตร

ซึ่งกันและกัน จึงทำให้ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้น จากการวิเคราะห์พบว่าถ้าจุดสัมผัส 2, 3 เข้าใกล้กันกว่าปกติเพียงนิดเดียว ปรากฏการณ์ก็จะเกิดขึ้นได้

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 39°C , 61°C และ 81°C แสดงรวมกันในตาราง 4.11 ส่วน $R_{ab,cd}$ หักหลาย และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของผลึก S_3 ที่คำนวณได้

ตาราง 4.11

ผลการทดลองวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึก S_3 ที่อุณหภูมิ 39°C , 61°C และ 81°C

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	I (mV)	$V_{43}(12)$ (mV)	$V_{14}(23)$ (mV)	$V_{21}(34)$ (mV)	$V_{32}(41)$ (mV)
39°C	0.20	99	4.7	97	4.8
	0.40	195	9.3	190	9.4
	0.60	288	13.9	278	14.0
	0.80	378	18.4	362	18.5
	1.00	465	23.2	430	22.9
	1.20	548	27.6	523	27.3
	1.40	631	32.0	599	31.6
61°C	0.20	70	4.4	73	4.2
	0.40	143	8.5	140	8.2
	0.60	212	12.8	206	12.3
	0.80	280	16.6	271	16.1
	1.00	346	21.2	334	20.1
	1.20	410	25.0	395	24.1
	1.40	473	29.2	495	27.9
81°C	0.20	54	3.9	56	3.7
	0.40	106	7.5	111	7.5
	0.60	159	11.0	165	11.2
	0.80	212	14.7	215	14.7
	1.00	265	18.4	267	18.2
	1.20	315	21.9	317	21.5
	1.40	365	25.5	366	25.6

แสดงรวมกันในตาราง 4.12 เหมือนเช่นในครั้งก่อน ρ_1 เป็น ρ ที่คำนวณได้จาก $R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ ρ_2 เป็น ρ ที่คำนวณได้จาก $R_{34,12}$ และ $R_{41,23}$ ส่วน $\bar{\rho}$ เป็น ค่าเฉลี่ยของ ρ ทั้งสอง

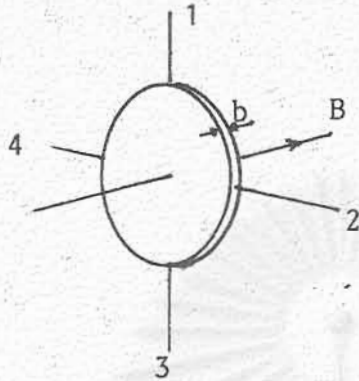
ตาราง 4.12

ค่า $R_{ab,cd}$ ต่าง ๆ และ ρ ของผลึก S3 ที่คำนวณได้

อุณหภูมิ $R_{ab,cd}$	30°C	39°C	61°C	81°C
$R_{12,34}(\Omega)$	490.5	465.3	344.3	260.0
$R_{34,12}(\Omega)$	442.3	441.5	318.6	265.8
$R_{23,41}(\Omega)$	25.98	22.80	20.71	18.05
$R_{41,23}(\Omega)$	24.03	22.87	19.80	18.13
$\rho_1(\Omega\text{-cm})$	69.9	63.8	51.0	40.3
$\rho_2(\Omega\text{-cm})$	63.5	62.5	47.6	40.9
$\bar{\rho}(\Omega\text{-cm})$	66.7	63.2	49.3	41.6

ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น $R_{12,34}$ ควรจะเท่ากับ $R_{34,12}$ และ $R_{23,41}$ ควรจะเท่ากับ $R_{41,23}$ ในตารางข้างบนค่า R ต่าง ๆ แตกต่างกันเล็กน้อยแสดงถึงความคลาดเคลื่อนของการทดลอง พบว่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 10.3 % และต่ำสุดเท่ากับ 0.3 % โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.8 %

ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น ได้ผ่านสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากระนาบของ ผลึกซึ่งแสดงในรูป ปลายกระแสไฟฟ้าผ่านจากขั้ว 3 ไป 1



รูป 4.14

การทดลองวัด R_H

จากนั้นวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 4 และ 2 และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B) และเมื่อ ไม่มีสนามแม่เหล็ก เราจะวัดสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้จากสมการ

$$R_H = \frac{b(\Delta R_{31,24})}{B} \quad (4.11)$$

โดย

$$\begin{aligned} \Delta R_{31,24} &= R_{31,24}(B) - R_{31,24}(0) \\ &= \frac{1}{I}(V_{42}(B) - V_{42}(0)) \end{aligned}$$

จากการทดลองพบว่ามีปัญหาในเรื่องความไวของ null detector ของ Galvanometer พบว่า ΔV ที่วัดได้มีค่าน้อย การวัดการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ ของ V นี้ทำได้ลำบากมาก จากการทดลองที่แล้วมาพบว่าเราไม่สามารถใช้กระแส I ที่มากได้ เพราะจะทำให้สมบัติของผลึกเปลี่ยนแปลงไปจากกฎของโอห์ม ประจวบกับความต้านทานของผลึกมีค่าสูง การวัดที่นิยมตำแหน่งหลัง ๆ ของโวลต์ทำได้ลำบาก อย่างไรก็ตามได้ทำการทดลองโดยใช้ $I = 1.0 \text{ mA}$ ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.13

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของผลึก S3

T(C)	V ₄₂ (mV)		ΔV(mV)	R _H (m ³ /C)
	B=0 w/m ²	B = 0.340 w/m ²		
31 ^o	382	376	6	-0.018
39 ^o	352	346	6	-0.018
61 ^o	384	278	6	-0.018
81 ^o	200	195	5	-0.015

จากการวิเคราะห์พบว่าผลึกเป็น n-type จากการวัดจะเห็นได้ว่า V ที่ได้มาจากตำแหน่งสุดท้ายของทศนิยมที่วัดได้ ความแม่นยำจึงไม่ค่อยมี จากผลที่อุณหภูมิ 81^oC เราคาดว่า R_H น่าจะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เครื่องมือไม่มี sensitivity พอที่จะจับได้

4.4 ผลการทดลองของผลึก S4

ผลึก S4 มีสูตรเป็น Ag(In_{0.8}Ga_{0.2})(Se_{0.2}Te_{0.8})₂ มีรูปร่างค่อนข้างรีหนา 0.100 ซม. วิธีการทดลองวัดค่า ρ ของผลึกนี้เหมือนกับผลึกอื่น ๆ ที่ได้ทำมาแล้ว พบว่าสภาพความต้านทานของผลึกนี้สูงมาก ความต่างศักย์ประมาณ 2 โวลต์จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน

เพียงประมาณไมโครแอมแปร์ ความไวของ null detector จึงต่ำกว่าที่แล้่วมา อย่างไรก็ตามยังสามารถวัด R ต่างๆ จากความชันของเส้น V, I จากกราฟได้ ตัวอย่างการทดลองวัด $R_{34,12}$ ที่อุณหภูมิ 30°C แสดงในตาราง 4.14 และในรูป 4.15

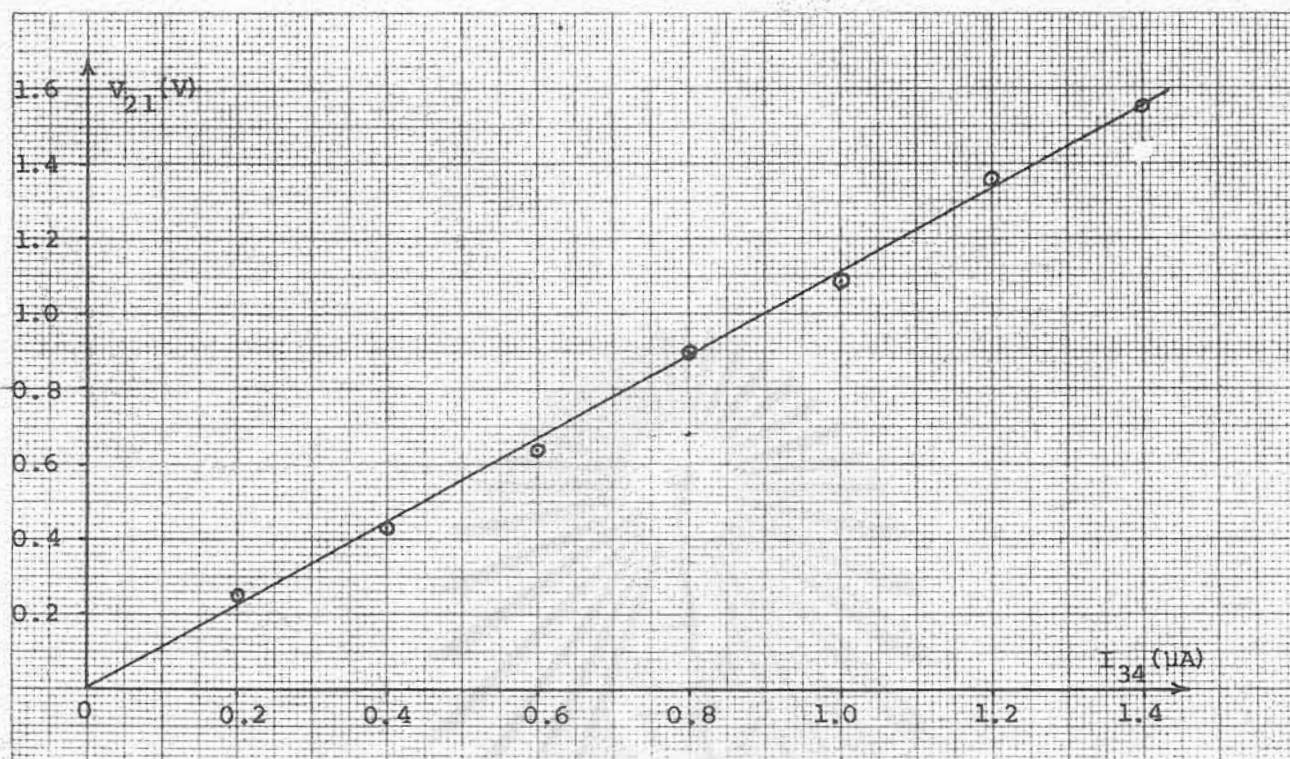
ตาราง 4.14

การวัด $R_{34,12}$ ของผลึก S_4 ที่อุณหภูมิ 30°C

$I_{34}(\mu\text{A})$	$V_{21}(\text{V})$
0.2	0.249
0.4	0.429
0.6	0.638
0.8	0.900
1.0	1.084
1.2	1.359
1.4	1.554

ผลการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ รวมสรุปในตาราง 4.15





รูป 4.15 การวัด $R_{34,12}$ ที่อุณหภูมิ 30°C ของผลึก S4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

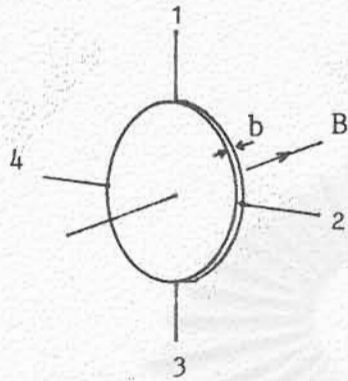
ตาราง 4.15

สภาพความต้านทานไฟฟ้าของผลึก S4 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ $R_{ab,cd}$	30°C	40°C	60°C	80°C
$R_{12,34}$ (MΩ)	1.04	0.455	0.172	0.108
$R_{34,12}$ (MΩ)	1.11	0.512	0.175	0.106
$R_{23,41}$ (MΩ)	0.949	0.449	0.190	0.101
$R_{41,23}$ (MΩ)	1.10	0.454	0.186	0.105
ρ_1 (Ω-cm)	4.51×10^5	2.05×10^5	0.820×10^5	0.474×10^5
ρ_2 (Ω-cm)	5.02×10^5	2.19×10^5	0.818×10^5	0.478×10^5
$\bar{\rho}$ (Ω-cm)	4.77×10^5	2.12×10^5	0.819×10^5	0.476×10^5

ในการวัดสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เราผ่านสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและตั้งฉากกับระนาบของผลึกดังแสดงในรูป 4.16 กระแสผ่านเข้าทางขั้ว 13 จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงของ V_{24} เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไป จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิห้องไม่สามารถจะวัดการเปลี่ยนแปลงของ V_{24} ได้ ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงถึง 0.34 เทสลาก็ตาม อาจจะเป็นเพราะว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกที่อุณหภูมิห้องสูงมาก ทำให้ null detector

ไวไม่พอ ที่อุณหภูมิอื่น ๆ ผลการวัดแสดงในตาราง 4.16



รูป 4.16 การวัด R_H ของผลึก

ตาราง 4.16

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของผลึก S4

อุณหภูมิ	$V_{24}(\text{mV})$		$\Delta V(\text{mV})$	R_H (m^3/C)
	$B = 0$	$B = 0.34 \text{ T}$		
40°C	376	341	35	-103
60°C	139	115	24	-71
80°C	107	95	12	-36

จากการทดลองการทดลองคำนวณ R_H จากสมการ

$$R_H = \frac{b\Delta V}{IB}$$

โดย $b = 0.100$ ซม. , $I = 1.00 \times 10^{-6}$ A , $B = 0.340$ T
 หลังจากแทนค่า V เราได้ R_H ดังแสดงข้างบน จากการพิจารณาพบว่า S_4 เป็นผลึกแบบ
 แบบ n

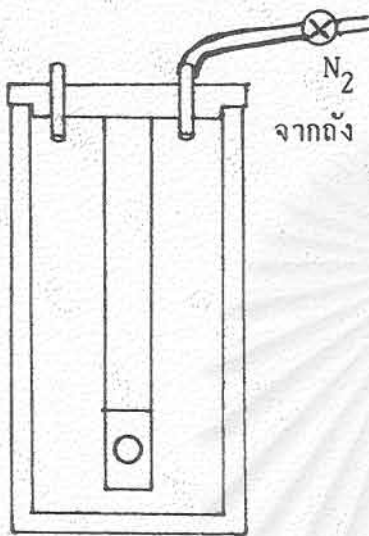
4.5 การทดลองที่อุณหภูมิต่ำ

ในการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกที่อุณหภูมิต่ำ พบว่ามีอุปสรรคเกี่ยวกับ
 จุดสัมผัสทางไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20°C ตัวนำเหลว In-Ga เริ่มแข็งตัวเป็น
 ของแข็งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาก ๆ เช่นประมาณ -20°C การสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยจะทำให้
 ลวดตัวนำหลุดออกจากผลึก นอกจากนั้นขณะที่อุณหภูมิลดลง การหดตัวของสารต่าง ๆ ที่ไม่เท่ากัน
 ก็ทำให้เกิดการแตกตัว (crack) ที่จุดสัมผัสระหว่างลวดตัวนำและผลึก ทำให้จุดสัมผัสทางไฟฟ้า
 เสียไป

ในการทดลองพบว่าอาจทำการวัดปริมาณต่าง ๆ ไปได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง แต่เนื่องจาก
 จุดสัมผัสเสียไปได้ง่ายมาก จึงไม่ได้ข้อมูลครบที่จะทำการวิเคราะห์ได้ ได้พยายามแก้ไขโดยทำให้
 เกิดแรงกดจากลวดตัวนำต่อผลึกโดยใช้สปริง โดยคิดว่าการยืด-หดจากสปริงจะช่วยแก้ปัญหาเกี่ยว
 กับการหดและขยายตัวที่ไม่เท่ากันของสาร แต่พบว่าไม่สามารถจะแก้ปัญหานี้ได้ ในการวิจัยได้
 สรุปว่า ถ้าจะทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ จะต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการทำจุดสัมผัสทางไฟฟ้าใหม่ ซึ่ง
 ต้องใช้เวลานานมาก ประจวบกับพบว่าข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับผลึกอยู่ในช่วงอุณหภูมิห้องซึ่งเป็นช่วงการ
 ใช้งาน ในการวิจัยจึงพยายามศึกษาคูสมบัติของผลึกแต่ในช่วงอุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าเท่านั้น

ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เช่น -70°C ในการทดลองได้บรรจุช่องระหว่าง dewar
 และท่อทองเหลือง (ในรูป 3.1 บทที่ 3 คือบริเวณ L) ด้วยน้ำแข็งแห้ง ทั้งนี้เพราะราคาถูก
 และทนอยู่ได้นาน พบว่ามีปัญหาอีกแบบหนึ่ง กล่าวคือไอน้ำที่อยู่ในท่อทองเหลืองกลั่นตัวเป็นน้ำและ
 เป็นน้ำแข็งในที่สุด น้ำหรือน้ำแข็งนี้อาจจับตัวบริเวณผลึก ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของผลึกเปลี่ยนไป
 อย่างมากมาย ทั้งนี้เพราะส่วนใหญ่ผลึกมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงมาก ทางแก้ไขที่ถูกต้องทำโดยปั๊ม

อากาศภายในห้องห้องเหล็องออก (โดยใช้ rough pump) จากนั้นบรรจุภายในห้องด้วยแก๊สไนโตรเจนแห้งจากถัง ปัญหาเรื่องการกลั่นตัวของไอน้ำจะหมดไป แต่ในการวิจัยนี้ได้พยายามหาวิธีที่ง่ายขึ้น โดยการเจาะรู 2 รู ที่ฝาแบคเคลสไลท์ (ตามรูปคือ A และ B)



ห้อง B ต่อกับถังแก๊สไนโตรเจน เมื่อเปิดวาว C ให้ไนโตรเจนเข้ามาในห้องอย่างช้า ๆ จะค่อย ๆ ไล่อากาศซึ่งเดิมอยู่ในห้องห้องเหล็องออกไปทาง A พนก๊าซไนโตรเจนต่อเนื่องกันสักช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นปิดทอ A ให้สนิท (พบว่าเพียงแต่ใช้จุกยางอุดก็พอ) แดงวาว C ให้ความดันของไนโตรเจนมากกว่าบรรยากาศเพียงเล็กน้อย ภายในห้องห้องเหล็องตอนนี้จะมีแก๊สไนโตรเจนแห้งบรรจุอยู่เต็ม

รูป 4.17 การบรรจุห้องห้องเหล็องในด้วยแก๊สไนโตรเจนแห้ง

จากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำแข็งแห้งลงใน dewar อุณหภูมิภายในห้องห้องเหล็องจะค่อย ๆ ลดลง แก๊สไนโตรเจนในห้องจะค่อย ๆ หดตัว แต่ไนโตรเจนจากถังจะบรรจุเต็มให้ความดันภายในคงที่อยู่ตลอดเวลา ในที่สุดก๊าซไนโตรเจนซึ่งอยู่รอบ ๆ ผลึกก็จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่เท่ากับที่ควบคุมโดยวงจร การทดลองก็จะทำได้โดยไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการกลั่นตัวของไอน้ำอีกต่อไป

เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องมือที่อุณหภูมิต่ำ ได้ทดลองศึกษาการนำไฟฟ้าของทองแดงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C โดยเอาแผ่น print ซึ่งใช้เป็นแผงเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์มาก็ควยกรจนเป็นรูปตามต้องการ จะได้แผ่นตัวอย่างทองแดงซึ่งบางมาก จุดสัมผัสของแผ่นทองแดงไม่มีปัญหาเพราะทำได้โดยการบัดกรี พบว่าการทดลองได้ผลดีและเครื่องมือทำงานที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ตามต้องการ

4.6 ผลลัพธ์ในเชิงทฤษฎีจากการทดลอง

ผลึกทั้งสี่ตัวที่วัดเป็น alloy ไม่ใช่ compound โครงสร้างของอะตอมในตำแหน่งต่าง ๆ ไม่แน่นอน อะตอมที่ตำแหน่งหนึ่ง ๆ ของ unit cell อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ การศึกษาผลึกโดยใช้ X-ray ยังให้ผลที่ไม่ละเอียดพอที่จะบอกโครงสร้างต่าง ๆ ของผลึกอย่างชัดเจน สำหรับอะตอมประเภทนี้ยังไม่มีทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่อธิบายปรากฏการณ์ขนส่งของผลึกอย่างแน่นอนได้ ธาตุที่ใช้ผสมกลายเป็นผลึกมีความบริสุทธิ์ 99.999 % ดังนั้นจึงมีสารแปลกปลอมอยู่ 0.001 % แต่ค่า ρ ของผลึกทั้งสามที่วัดได้อยู่ในช่วง 10^{-2} ohm-cm ถึง 10^9 ohm-cm ที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นช่วงของสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารแปลกปลอมจำนวนน้อยนั้นไม่ทำให้สมบัติเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของผลึกเสียไป

ในกรณีนี้เราพยายามแปรผลที่ได้จากการทดลองโดยเทียบกับทฤษฎีง่าย ๆ ของสารกึ่งตัวนำ (simple theory of semiconductor)⁴ จากการศึกษาทาง optical properties พบว่า band gap (E_g) ของผลึกมีค่าประมาณ 1 eV^{5,6} ที่อุณหภูมิห้อง,
 $T = 300$ K

$$kT = 0.026 \text{ eV} \ll E_g \quad (4.12)$$

หมายความว่าสำหรับ intrinsic semiconductor ความหนาแน่นของพาหะตัวนำจะเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิดังสมการ

$$n = Ce^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (C = \text{constant}) \quad (4.13)$$

และอาจกล่าวได้ว่า mobility จะเปลี่ยนไปกับอุณหภูมิดังสมการ

$$\mu = CT^{-a}, \quad (C = \text{constant}) \quad (4.14)$$

โดย a เป็นค่าคงที่ ใน silicon a มีค่าประมาณ 1.5 และสภาพต้านทานไฟฟ้าอาจเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{m^*}{ne^2\tau} = \frac{1}{ne} \left(\frac{m^*}{e\tau} \right) = \frac{1}{ne\mu} \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.13) และ (4.14) โดยใช้ $a = 1.5$ เราอาจเขียนสมการข้างบนได้ว่า

$$\rho \propto T^{1.5} e^{+\frac{E_g}{2kT}} \quad (4.16)$$

ขอให้เราพิจารณาข้อมูลในตารางข้างล่าง สำหรับที่อุณหภูมิ 30°C และ 80°C

ตารางที่ 4.17

เทียบการเปลี่ยนแปลงของ ρ ของตัวอย่างผลึกกึ่งตัวนำแบบ intrinsic

$t^\circ\text{C}$	T(K)	$\exp(E_g/2kT)$	$T^{1.5}$	$T^{1.5}\exp(E_g/2kT)$
30°C	303	2.04×10^8	5274	107×10^{10}
80°C	353	0.14×10^8	6632	9.3×10^{10}

จะเห็นได้ว่าสำหรับ intrinsic semiconductor ที่มีสมบัติเช่นกล่าวข้างบน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C ถึง 80°C ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงถึงประมาณ 12 เท่า

จากตาราง 4.8 จะเห็นได้ว่า ρ ของผลึก S2 เปลี่ยนแปลงน้อยมากไปกับอุณหภูมิ ($\rho_{78}/\rho_{28} = 1.16$) ซึ่ง ρ ยังเพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มคล้าย ๆ กับในกรณีของโลหะ มองในแง่ simple model เป็นไปได้ว่าพาหะนำไฟฟ้าของผลึกนี้จะมีค่าคงที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิขณะที่สภาพความต้านทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ mobility หรือ relaxation time ไปกับอุณหภูมิ ในสภาพเช่นนี้ผลึก S2 จะไม่ใช่ intrinsic

semiconductor สภาพนำไฟฟ้าของผลึกจะถูกควบคุมโดย impurity หรือ defect ของโครงสร้างของผลึก ซึ่งที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าเกือบคงที่และมีจำนวนมากกว่า intrinsic carriers มากนัก สภาพนำไฟฟ้าของผลึกจึงถูกควบคุมโดยพาหะซึ่งมาจากสิ่งแปลกปลอม หรือความผิดปกติของโครงสร้างนี้ อาจกล่าวได้ว่าผลึก S2 มีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์พอ

สำหรับผลึก S3 จากตาราง 4.12 พบว่า ρ ค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดน้อยมาก พบว่า

$$\frac{\rho_{30}}{\rho_{81}} = 1.6$$

ซึ่งน้อยกว่าอัตราส่วนของผลึกกึ่งตัวนำแบบ intrinsic ดังตัวอย่างในตาราง 4.17 มาก (จากตาราง $\rho_{30}/\rho_{80} = 12$) เนื่องจากเวลาผ่อนคลายของพาหะเปลี่ยนแปลงบ้างในช่วงอุณหภูมินี้ แต่ไม่มาก แสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าของผลึก S3 ถูกควบคุมโดยพาหะจากสิ่งแปลกปลอม หรือโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์เช่นผลึก S2 ที่อุณหภูมิห้องพาหะประเภทหนึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิดังที่กล่าวไปแล้ว จากตาราง 4.13 ถ้าเรารู้ว่าพาหะเป็นประเภท n ประเภทเดียว เราจะได้ว่า

$$R_H = \frac{1}{ne} = 0.018$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{0.018 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 3.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \\ &= 3.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

ซึ่งนับว่ามากสำหรับผลึกที่มี $E_g = 1 \text{ eV}$ จะเห็นได้ว่าพาหะที่เพิ่มขึ้นมานี้เนื่องมาจากสิ่งแปลกปลอมหรือความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างดังที่กล่าวข้างบน อย่างไรก็ตามจากตาราง 4.13 พบว่าพาหะตัวนำมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูง ซึ่งคงจะเป็นผลมาจากส่วนเพิ่มเติมของ

intrinsic carriers เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ผลึก S4 ซึ่งผลการทดลองแสดงในตาราง 4.15 นับว่าเป็นผลึกที่สมบูรณ์ที่สุดในจำนวนผลึกทั้งหมดที่ทดลอง สภาพนำไฟฟ้าลดลง 10 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 30°C เป็น 80°C

$$\frac{P_{30}}{P_{80}} = 10$$

คล้ายคลึงกับในตาราง (4.17) และจากตาราง 4.16 พบว่า R_H ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 40°C ถึง 80°C ลดลงถึง 3 เท่า แสดงว่าความหนาแน่นของพาหะเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าในช่วงนี้ เราสรุปว่าในจำนวนผลึกทั้งหมด S4 มีแนวโน้มว่าจะเป็น intrinsic semiconductor ใดมาก และสมควรที่จะศึกษาโดยละเอียดต่อไป

4.7 ข้อเสนอแนะ

เครื่องมือที่ได้อาจสร้างขึ้น สามารถทำการทดลองได้อุณหภูมิสูงกว่าที่ทำการวิจัยนี้ และถ้ามีเวลาอาจทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ละเอียดขึ้น แต่จากผลการวิจัยเรามองเห็นชัดว่า ปัญหาหลักอาจจะมาจากโครงสร้างของผลึกที่ได้เตรียมขึ้น ผลึกทั้งหมดนอกจาก S4 จากผลการทดลองแสดงว่ายังมีโครงสร้างที่ไม่ดีนัก ดังนั้นในการวิจัยต่อไปจึงควรหันไปปรับปรุงระบบการสร้างผลึก และทำการทดลองซ้ำใหม่อีกครั้งหนึ่งพร้อมทั้งอาจตรวจสอบโดยเทคนิคทางรังสีเอกซ์ ต่อเมื่อได้ผลึกที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์แล้ว การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ อย่างละเอียด จึงจะสามารถทราบถึงขบวนการขนส่งทางไฟฟ้าของผลึกอย่างดีได้ ขณะนี้กำลังในระหว่างปรับปรุงและตระเตรียมการสังเคราะห์ผลึกเพิ่มเติม

ปัญหาที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ เรื่องของจุดสัมผัสทางไฟฟ้าควรมีการปรับปรุงเพื่อให้สามารถทดลองใช้ได้อุณหภูมิต่ำ ๆ เช่นพยายามทำจุดสัมผัสโดยใช้สารชนิดอื่นซึ่งมันคงกว่า หรือการทำแผ่นยึดผลึกที่สามารถยึดผลึกได้มั่นคงและไม่มีสารสัมผัสที่รบกวนการทดลอง การศึกษาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้ผลการวิจัยที่สมบูรณ์ขึ้น

บรรณานุกรม

1. L.J. Van der Pauw, Philips Res.Repts. 13, 1(1958).
2. N.V. Joshi, L. Martinez and R. Echeveria, J. Phys. Chem. Solids, 42, 281(1981).
3. C. Paorici, L. Zanotti and G. Zuccalli, J. Crystal Growth. 43, 705(1978).
4. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, John Wiley and Sons Inc.(1971), Chapter 11.
5. G.H. Chapman, J. Shewchun, B.K. Garside, J.J. Loferski and R. Beauliea, Solar Energy Material 1, 451(1979).
6. Julie E. Avon, Tom Denofrio and John C. Woolley, J. Appl. Phys. 55, 8(1984).

