การศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายในผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 77 องศาเคลวินถึงอุณหภูมิห้อง

หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายธีรพันธุ์ ม่วงไทย

001060

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

แผนกวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2521

I15884156X

A Study of Transport Phenomena in Crystals between 77°K and Room Temperature

Mr. Theerapun Muangthai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1978

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายในผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 77 องศาเคลวินถึงอุณหภูมิห้อง

โดย นายธีรพันธุ์ ม่วงไทย

แผนกวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....รักษาการในตำแหน่ง

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค) คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิยโย บันยารชุน)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ลิขิต ฉัตรสกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนย้ายในผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิระหว่าง 77 องศาเคลวินถึงอุณหภูมิห้อง

ชื่อนิสิต นายธีรพันธุ์ ม่วงไทย

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช

แผนกวิชา พิสิกส์

ปีการศึกษา 2521

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การวิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติของสารต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง ($300^{\circ}K$) และต่ำลงไปจนถึงอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ($77^{\circ}K$) อุปกรณ์ส่วนมากที่ใช้ทดลองเป็นต้นว่าภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว อุปกรณ์ให้ความร้อนที่ให้กำลังคงที่และกล่องวัดสภาพนำความร้อน สร้างจากวัสดุที่มีในประเทศ

ได้ทดลองวัดความต่างศักย์ฮอลของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ $77^{\circ}K$ เพื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะตัวนำ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำตัวอย่างพบว่า ที่อุณหภูมิห้อง $n_{300} = (9.54 \pm 0.10) \times 10^{22}$ เมตร$^{-3}$ ที่อุณหภูมิ $77^{\circ}K$ $n_{77} = (4.28 \pm 0.07) \times 10^{21}$ เมตร$^{-3}$ โดยอัตราส่วน $n_{300}/n_{77} = 22.29$ แสดงว่าความหนาแน่นของพาหะตัวนำของสารกึ่งตัวนำน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงสอดคล้องกับทฤษฎีที่มีอยู่ ในการทดลองกับสารตัวอย่างทองแดงบาง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง $n_{300} = (8.68 \pm 0.43) \times 10^{28}$ เมตร$^{-3}$ และที่อุณหภูมิ $77^{\circ}K$ $n_{77} = (8.03 \pm 0.31) \times 10^{28}$ เมตร$^{-3}$ จากความหนาแน่นของพาหะตัวนำและสภาพนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิทั้งสองนี้ สามารถนำไปคำนวณหาอัตราส่วนของเวลาผ่อนคลายได้ว่า $\tau_{300}/\tau_{77} = 0.125$ ผลลัพธ์ข้างบนนี้แสดงว่า ความหนาแน่นของพาหะตัวนำของวัสดุตัวนำไฟฟ้าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเวลาผ่อนคลายของพาหะตัวนำ

ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอันเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างอิเลกตรอนกับโฟนอนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีของอิเลกตรอนทุกประการ

ในการวิจัยยังได้ศึกษาสภาพนำความร้อนของฉนวนด้วย เนื่องจากความสามารถของเทอร์มิสเตอร์มีจำกัด จึงทดลองในช่วงอุณหภูมิ $-40^{\circ}C$ ถึง $40^{\circ}C$ การทดลองทำในกล่องซึ่งสูบอากาศออกจนมีความดันประมาณ 10^{-2} ทอร์ เพื่อขจัดข้อผิดพลาดจากการพาความร้อน ในการวัดสภาพนำความร้อนของแผ่นกระจกและแผ่นพลาสติกหลาย ๆ ชิ้น พบว่า สำหรับกระจก $K = 0.842 \pm 0.062$ วัตต์เมตร$^{-1}$ องศาเซนติเกรด$^{-1}$ และพลาสติก $K = 0.201 \pm 0.009$ วัตต์ เมตร$^{-1}$ องศาเซนติเกรด$^{-1}$ ในการวัดนี้ให้ผลซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% ผลการทดลองนี้แสดงว่า สภาพนำความร้อนของสารเหล่านี้ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว การคงที่ของสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิช่วงนี้เป็นลักษณะทั่ว ๆ ไปของสารอสัณฐาน ซึ่งวิธีอิสระเฉลี่ยของโฟนอนไม่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ

Thesis Title A Study of the Transport Phenomena in Crystals between $77^{o}K$ and Room Temperature

Name Mr. Theerapun Muangthai

Thesis Advisor Dr. Anuntasin Tachagumpuch

Department Physics

Academic Year 1978

ABSTRACT

The properties of matters at temperature ranging from room temperature ($300^{o}K$) down to liquid nitrogen temperature ($77^{o}K$) were studied. Several instruments are constructed notably a container of liquid nitrogen, a constant power heater and a chamber for measuring thermal conductivity; most of these made using materials produced in Thailand.

Hall voltages of samples are measured by the constructed instruments at room temperature and $77^{o}K$ in order to deduce the carrier density. The values of the semiconductor sample are found to be $n_{300} = (9.54 \pm 0.10) \times 10^{22}\ m^{-3}$ and $n_{77} = (4.28 \pm 0.07) \times 10^{21}\ m^{-3}$ at room temperature and $77^{o}K$ respectively. The ratio of these carrier densities is $n_{300}/n_{77} = 22.29$ which indicates that the carrier density of semiconductor decreases with decreasing temperature in agreement with the existing theory. For thin copper sample, the carrier density at room temperature is $n_{300} = (8.68 \pm 0.43) \times 10^{28}\ m^{-3}$ and $n_{77} = (8.03 \pm 0.31) \times 10^{28}\ m^{-3}$ at $77^{o}K$. This carrier density ratio of thin

copper together with its measured conductivity values in turn give its relaxation time ratio $\tau_{300}/\tau_{77} = 0.125$. This result shows that the carrier density of conducting materials seldom varies with temperature. However, as temperature increases, which implies a greater interaction between electrons and phonons, the relaxation time of charge carrier decreases. The behavior of the carrier density of conducting materials and its relaxation time with temperature both are also in agreement with the theory of electrons.

The thermal conductivities of several insulators are also studied. Only temperature ranging from $-40^{\circ}C$ up to $40^{\circ}C$ can be registered due to the limited capacity of the thermister. To minimize errors from convection, the measurements are performed in the chamber with a pressure of 10^{-2} torr. With this set up, the thermal conductivities of plastic and glass measured and the result for glass is $K = 0.842 \pm 0.062$ W/m$^{\circ}$C and for plastic is $K = 0.201 \pm 0.009$ W/m$^{\circ}$C. The error involved in this measurement is about 5%. These results show that the thermal conductivity of these insulators rarely vary with temperature within this range, which elucidates the general characteristic of amorphous materials whose mean free path of phonon does not change with temperature.

หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช ซึ่งให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านเป็นอย่างยิ่ง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภิยโย ปันยารชุน ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับปัญหาที่ประสพในการวิจัย จึงขอขอบพระคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้.

อนึ่งเมื่อผู้เขียนสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวิจัย ได้รับความสะดวกอย่างมากในการใช้เครื่องมือจากกองเครื่องมือและอุปกรณ์ จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย และขอขอบคุณ คุณสาโรช พันธุ์แพ นิสิตปริญญาโทแผนกวิชาเคมีได้กรุณาสละเวลาช่วยกลั่นเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้ในการวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฆ

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

รายการตารางประกอบ ..... ฌ

รายการรูปประกอบ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำและทฤษฎี 1

1.1 บทนำ 1

1.2 สมการโบล์ทซมาน 3

1.3 สภาพนำไฟฟ้า 9

1.4 ปรากฏการณ์ของฮอล 13

1.5 สารกึ่งตัวนำ 15

1.5.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก 15

1.5.2 สารกึ่งตัวนำเอกทรินซิก 17

1.5.3 การหาความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากแอกเซพเตอร์ถูกไอออนไนซ์ที่อุณหภูมิ T 18

1.6 สภาพนำความร้อนของฉนวน 20

1.6.1 ทฤษฎีทั่ว ๆ ไปเกี่ยวกับสภาพนำความร้อนของโฟนอน 20

1.6.2 หลักเกณฑ์ในการวัดสภาพนำความร้อน 23

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 2 การสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง..... 25

2.1 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้วัดความต่างศักย์ของฮอล..... 25

2.2 ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว..... 26

2.3 สารตัวอย่างและการสร้างภาชนะสารตัวอย่าง..... 26

2.3.1 ซิลิกอนสารตัวอย่าง..... 26

2.3.2 ผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่าง..... 27

2.3.2 ก. วิธีสร้างภาชนะสารตัวอย่าง..... 28

2.3.2 ข. การเตรียมจุดสัมผัสผลึกกึ่งตัวนำ สารตัวอย่าง..... 29

2.3.3 ทองแดงสารตัวอย่าง..... 29

2.3.3 ก. การวัดขนาดทองแดง..... 30

2.4 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้วัดสภาพนำความร้อน..... 32

2.5 การสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดสภาพนำความร้อน..... 33

2.5.1 ภาชนะสำหรับทดลอง..... 33

2.5.2 อุปกรณ์ให้ความร้อน..... 34

2.5.3 ที่วางกล่องโฟม..... 35

2.6 สารตัวอย่างและ การจัดวางในภาชนะสำหรับทดลอง..... 36

บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง..... 38

3.1 การทดสอบคุณลักษณะประจำตัวของเทอร์มิสเตอร์..... 38

3.2 การวัดความต่างศักย์ของฮอล..... 43

3.2.1 ซิลิกอนสารตัวอย่าง..... 43

3.2.2 ผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่าง..... 47

3.2.3 ทองแดงสารตัวอย่าง..... 53

หน้า

3.3 การวัดปริมาณความร้อนที่เสียไป..... 63

3.4 การวัดสภาพนำความร้อนของพลาสติก..... 66

3.5 การวัดสภาพนำความร้อนของกระจก..... 71

บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 80

4.1 ภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว..... 80

4.2 เทคนิคต่าง ๆ ในการสร้างจุดสัมผัสทางไฟฟ้า..... 80

4.3 ความเหลื่อมกันของจุดสัมผัสที่ใช้วัดความต่างศักย์ของฮอลของผลึกกึ่งตัวนำ..... 91

4.4 ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลของสารตัวอย่าง..... 93

4.4.1 ผลึกซิลิกอนสารตัวอย่าง..... 83

4.4.2 ผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่าง..... 83

4.4.3 ทองแดงสารตัวอย่าง..... 85

4.5 พลังงานความร้อนที่สูญเสียไป..... 87

4.5.1 การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี..... 88

4.5.2 การสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนของลวดนำกระแสของอุปกรณ์ให้ความร้อนและลวดของเทอร์มิสเตอร์..... 89

4.6 การทดลองวัดสภาพนำความร้อน..... 91

4.7 ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของสารตัวอย่าง..... 93

4.7.1 ข้อผิดพลาดของการวัดสภาพนำความร้อน..... 94

4.7.2 ความหนาของสารตัวอย่าง..... 95

4.7.3 สภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 95

4.7.4 การปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับวัดสภาพนำความร้อนเพื่อทดลองในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น..... 96

เอกสารอ้างอิง..... 97

ประวัติ..... 99

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงความหนาของทองแดงแผ่นแรก.....	30
2.2	แสดงความหนาของทองแดงแผ่นที่สอง.....	31
3.1	ผลการทดลองหาคุณลักษณะประจำตัวของเทอร์มิสเตอร์เบอร์ YSI44008	39 และ43
3.2	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลของผลึกซิลิกอนสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง.....	44
3.3	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลของผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง.....	47
3.4	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลของผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ $77^{\circ}K$	48
3.5	ความหนาแน่นของพาหะของผลึกกึ่งตัวนำสารตัวอย่าง.....	53
3.6	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ของฮอลของทองแดงสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง.....	54-55
3.7	ผลการวัดความต่างศักย์ของฮอลของทองแดงสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ $77^{\circ}K$	55-56
3.8	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 3 และจุด 4 ของทองแดงสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง.....	56
3.9	ผลการทดลองวัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 3 และจุด 4 ของทองแดงสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ $77^{\circ}K$.....	57
3.10	ความหนาแน่นของอิเลกตรอนของทองแดงสารตัวอย่าง.....	60
3.11	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของทองแดงสารตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ $77^{\circ}K$.....	61
3.12	ค่านิจของฮอลและวาเลนซ์อิเลกตรอนของทองแดงสารตัวอย่างจากการทดลอง.	63
3.13	ผลการทดลองของแอสเบสทอสเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็ง.....	65

ตารางที่ หน้า

3.14 ผลการทดลองของแอสเบสทอสเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง..... 65

3.15 ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อน ของพลาสติกเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ใน น้ำแข็ง..... 67-68

3.16 ค่าสภาพนำความร้อนของพลาสติกที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ถึง $40^{\circ}C$ 71

3.17 ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของกระจกเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ใน น้ำแข็ง..... 72-73

3.18 ผลการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของกระจกเมื่อภาชนะทดลองแช่อยู่ใน น้ำแข็งแห้ง..... 73-74

3.19 แสดงความชันของกราฟจากการทดลองวัดสภาพนำความร้อนของกระจก.... 74

3.20 ค่าสภาพนำความร้อนของกระจกที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ถึง $40^{\circ}C$ และ $-40^{\circ}C$ ถึง $-30^{\circ}C$ 79

4.1 แสดงความหนาแน่นของโฮลของผลึกกึ่งตัวนำ..... 83

4.2 แสดงความหนาแน่นของโฮลของสารกึ่งตัวนำที่คำนวณได้จากทฤษฎี..... 84

4.3 แสดงผลการทดลองของทองแดง..... 85-86

4.4 แสดงสภาพนำความร้อนของพลาสติกที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ถึง $40^{\circ}C$ 93

4.5 แสดงสภาพนำความร้อนของกระจก..... 94

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ปรากฏการณ์ของฮอลในกรณีที่พาหะตัวนำคืออิเลกตรอน.....	13
1.2	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ $0^{\circ}K$ เทียบกับฉนวน.....	16
1.3	แสดงระดับของโดเนอร์และแอกเซพเตอร์ในแถบห้ามของสารกึ่งตัวนำ.....	18
1.4	การเคลื่อนย้ายพลังงานโดยโฟนอนผ่านระนาบ x	20
2.1	แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองวัดความต่างศักย์ฮอล.....	25
2.2	โฟมใช้เป็นภาชนะใส่ไนโตรเจนเหลว.....	26
2.3	ซิลิกอนที่ใช้ทดลองและภาชนะใส่ซิลิกอน.....	26
2.4	แสดงการจัดตัวของลวดทองแดง.....	27
2.5	ภาชนะสารตัวอย่างผลึกกึ่งตัวนำที่ใช้ทดลองได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ $77^{\circ}K$	28
2.6	ลักษณะของทองแดงสารตัวอย่างที่ใช้ทดลอง.....	29
2.7	แผนผังการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้วัดสภาพนำความร้อน.....	32
2.8	ภาชนะสำหรับทดลอง.....	33
2.9	อุปกรณ์ให้ความร้อน.....	34
2.10	ที่วางกล่องโฟม.....	35
2.11	แสดงการจัดวางสารตัวอย่างในภาชนะสำหรับทดลอง.....	37
3.1	แสดงแผนผังของอุปกรณ์ที่ทดลองหาคุณลักษณะประจำตัวของเทอร์มิสเตอร์.....	38
3.2	คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ระหว่างอุณหภูมิ $27^{\circ}C$ ถึง $50^{\circ}C$ จากการทดลองเทียบกับของบริษัทผู้ผลิต.....	40
3.3	คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ระหว่างอุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ถึง $40^{\circ}C$ ของบริษัทผู้ผลิต.	41
3.4	คุณลักษณะของเทอร์มิสเตอร์ระหว่างอุณหภูมิ-$40^{\circ}C$ ถึง $-25^{\circ}C$ ของบริษัทผู้ผลิต.....	42

รูปที่ หน้า

3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของผลึกซิลิกอนที่อุณหภูมิห้อง 46

3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของผลึกกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้องเมื่อ I = 4 มิลลิแอมแปร์.. 49

3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของผลึกกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้องเมื่อ I = 5 มิลลิแอมแปร์.. 50

3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของผลึกกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ 77°K เมื่อ I = 4 มิลลิ. แอมแปร์..... 51

3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของผลึกกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ 77°K เมื่อ I = 5 มิลลิแอมแปร์ 52

3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของทองแดงหนา 3.69×10^{-3} ซม..... 58

3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์ของคู่ที่ใช้วัดความต่างศักย์ฮอลของทองแดงหนา 3.88×10^{-3} ซม..... 59

3.12 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณความร้อนที่เสียไป..... 64

3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของพลาสติกในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C 69

3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของพลาสติก เมื่อหักปริมาณความร้อนที่เสียไป ในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C 70

3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของกระจกใส ในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C..... 75

รูปที่ หน้า

3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของกระจกใส ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง -30°C 76

3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของกระจกใส เมื่อหักปริมาณความร้อนที่เสียไป ในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 40°C 77

3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่กำเนิดในอุปกรณ์ให้ความร้อน (IV) กับอุณหภูมิที่ผิวบนของกระจกใส เมื่อหักปริมาณความร้อนที่เสียไป ในช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง -30°C 78

4.1 แสดงจุดสัมผัสทางไฟฟ้าของผลึกกึ่งตัวนำ..... 81