



ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์
ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

นายสมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งเป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

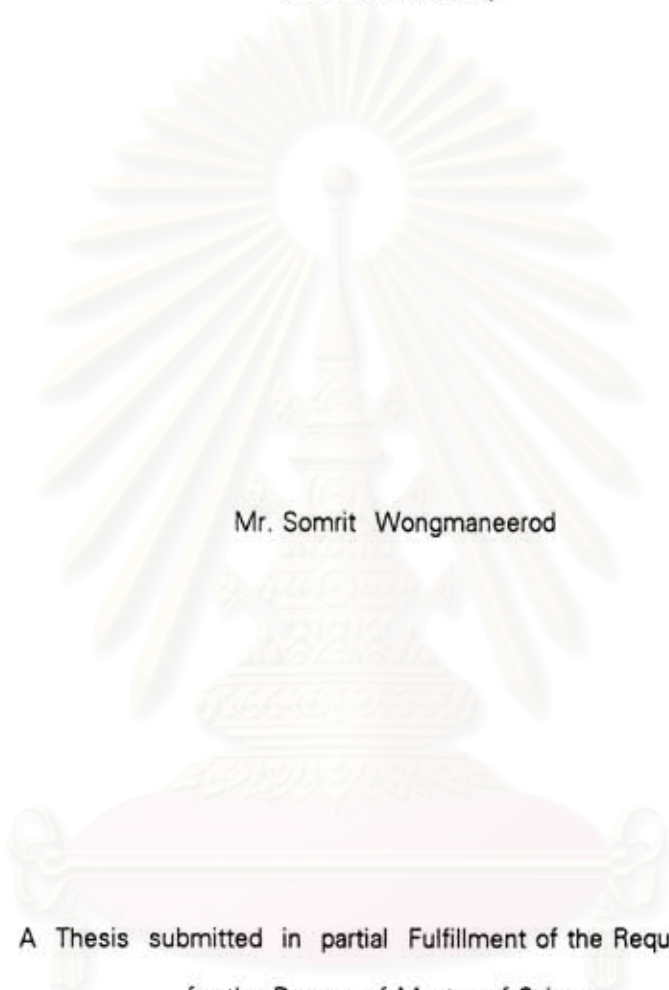
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-631-553-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Computerized system for measuring resistivity
and Hall mobility



Mr. Somrit Wongmaneerod

A Thesis submitted in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

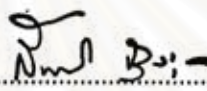
ISBN 974-631-553-6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

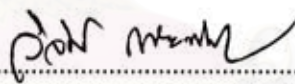


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์
ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์
โดย นายสมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภกรณ์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

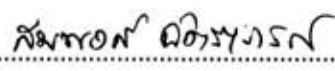

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ดุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เล็งนะพันธ์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวยศ อยู่ดี)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภกรณ์)



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สมฤทธิ์ วงศ์ฉวีโรจน์ : ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้
ของฮอลล์ควมคุมโดยคอมพิวเตอร์ (Computerized system for measuring resistivity and
Hall mobility) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ , 115 หน้า . ISBN 974-631-553-6

ได้ออกแบบและสร้างระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ควบคุมการวัดด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพเคลื่อนที่ได้ และความหนาแน่นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ ระบบวัดนี้สามารถรองรับการวัดสารตัวอย่างที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าในช่วงกว้าง ($10^{-3}\Omega/\text{sqr}$ ถึง $10^7\Omega/\text{sqr}$) และ พร้อมด้วยระบบห้องวัดอุณหภูมิต่ำทำให้การวัดทำได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิลดลงจนถึง 80 K เพื่อให้ได้ผลการวัดที่มีความถูกต้องมากที่สุด จึงได้ปรับปรุงวิธีที่ใช้ในการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิคให้กับสารตัวอย่างที่จะนำมาวัด โดยการสร้างเตาแอนนิลสำหรับแอนนิลขั้วไฟฟ้าในบรรยากาศของไฮโดรเจน ระบบวัดที่สร้างขึ้นได้ใช้ในการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสารตัวอย่าง InSb และ GaAs ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจนถึง 80 K พบว่าสมบัติไฟฟ้าของ InSb มีการแปรตามอุณหภูมิต่างเห็นได้ชัด และสามารถคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานจากข้อมูลที่วัดได้เท่ากับ 0.245 eV และจากการศึกษาฟิล์มบางของ CuInSe_2 ที่อุณหภูมิต่ำด้วยระบบวัดที่สร้างขึ้น ข้อมูลจากการวัดทำให้ทราบว่าฟิล์มบางที่นำมาวัดมีเนื้อฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอและสามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของเนื้อฟิล์มได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2537

ลายมือชื่อนิสิต สมฤทธิ์ วงศ์ฉวีโรจน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมพงษ์ ฉัตรภรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C425362 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD:

RESISTIVITY / HALL MOBILITY / VAN DER PAUW

SOMRIT WONGMANEEROD : COMPUTERIZED SYSTEM FOR MEASURING

RESISTIVITY AND HALL MOBILITY. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF.

SOMPONG CHATRAPHORN, M.S. 115 pp. ISBN 974-631-553-6

The computerized Hall effect measurement system for measurement of resistivity, mobility and carrier concentration in semiconductors was constructed. It has a wide range of resistivity measurement capabilities ($10^{-3}\Omega/\text{sqr}$ to $10^7\Omega/\text{sqr}$) with a cryostat for performing the experiments from room temperature down to 80 K. In order to obtain an accurate measurement result, an ohmic contact fabrication technique for this measurement system was also improved by constructing an annealing furnace for ohmic contacts in H_2 atmosphere. The measurement system was used to study electrical properties of bulk InSb and GaAs samples from room temperature to 80 K as well as CuInSe_2 thin film at room temperature. The energy gap of bulk InSb is determined to be 0.245 eV. From measurement of CuInSe_2 thin film, the uniformity of films can be observed and the density profile can be analyzed.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... Physics

สาขาวิชา..... Physics

ปีการศึกษา..... 1994

ลายมือชื่อนิสิต..... สอมฤทธิ์ วงศ์มนัส

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... สัมพงษ์ ฉัตรพจนาน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ อัตรากรณ์ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อู่ยดี และ อาจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อเขียนวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับการสนับสนุนอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์วิสิทธิ์ ลีลาศิริวงศ์ คุณธนา สุทธิโอกาสและคณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับวิชาการด้านฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนเข้ารับศึกษาในระดับปริญญาตรีและโท ผู้เขียนได้รับการอนุเคราะห์ค่าเล่าเรียนและค่าใช้จ่ายทั้งหมด จากโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความรู้และความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์ (พสวท.) ผู้เขียนจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในโครงการการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน คุณชาญวิทย์ จิตยุทธการ และ คุณณรงค์ แสงแก้ว นิสิตปริญญาโทบัณฑิตที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับการวัด และ ให้คำปรึกษาปัญหาเกี่ยวกับการวัด

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณแม่ อาโก และ พี่น้องทุกคน ที่ให้ความอุปการะแก่ผู้เขียนและให้กำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ณ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ 1. บทนำ..... | 1 |
| บทที่ 2. สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์..... | 4 |
| สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ..... | 4 |
| 1. สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก..... | 5 |
| 2. สารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรีนสิก..... | 7 |
| สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้..... | 11 |
| ปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 15 |
| การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคของวานเดอร์พาว..... | 20 |
| ขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก..... | 24 |
| บทที่ 3. ระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 27 |
| แนวคิดพื้นฐานของระบบ..... | 27 |
| รูปแบบการวัดและการประมวลผล..... | 30 |
| 1. การวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว..... | 30 |
| 2. การวัดโดยวิธีฮอลล์บาร์..... | 31 |
| การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัด..... | 30 |
| โปรแกรมควบคุมการวัด เก็บข้อมูล และการประมวลผล..... | 33 |
| การใช้งานระบบวัด..... | 52 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4. การทดลองและผลการทดลอง..... | 53 |
| การทดสอบระบบวัดเบื้องต้นด้วยวงจรวัดต้านทาน..... | 53 |
| การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์..... | 57 |
| กระบวนการติดขั้วไฟฟ้าและการแอนนิลสารตัวอย่าง..... | 58 |
| การศึกษาความคลาดเคลื่อนจากการวัดเมื่อขั้วสัมผัส ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทางทฤษฎี..... | 63 |
| การศึกษาผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของ GaAs โดยวิธีวานเดอร์พาฟ และฮอลล์บาร์..... | 66 |
| การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์จาก GaAs และ InSb ที่อุณหภูมิต่ำ..... | 68 |
| การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์..... | 80 |
| บทที่ 5. สรุปและวิจารณ์ผล..... | 90 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 93 |
| ภาคผนวก..... | 95 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 103 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | ค่าเวลาอิสระเฉลี่ยและสภาพเคลื่อนที่ได้จากกลไกการกระเจิงชนิดต่างๆ.....13 |
| 2.2 | ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆจากทฤษฎีของวานเดอร์พาว.....23 |
| 3.1 | รูปแบบการวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว.....29 |
| 3.2 | สมการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว.....30 |
| 3.3 | สมการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากการวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว.....31 |
| 3.4 | รูปแบบการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีฮอลล์บาร์.....32 |
| 3.5 | สมการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการวัดโดยวิธีฮอลล์บาร์.....31 |
| 3.6 | สมการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากการวัดด้วยวิธีฮอลล์บาร์.....33 |
| 4.1 | แสดงข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตัวต้านทาน 11 ชุด.....55 |
| 4.2 | แสดงข้อมูลจากวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ จากขั้วสัมผัสชุดต่างๆบนสารตัวอย่าง GaAs แผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.28 นิ้ว.....64 |
| 4.3 | แสดงการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพเคลื่อนที่ได้จากขั้วสัมผัสชุดต่างๆ.....64 |
| 4.4 | แสดงข้อมูลปรากฏการณ์ฮอลล์ที่วัดจากสารตัวอย่าง GaAs 5 ชุด.....66 |
| 4.5 | ข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ.....71 |
| 4.6 | ข้อมูลสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ.....71 |
| 4.7 | แสดงข้อมูลความหนาแน่นพาหะของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ.....73 |
| 4.8 | แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ.....74 |
| 4.9 | แสดงสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ.....75 |
| 4.10 | แสดงความเข้มข้นพาหะอิสระของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ.....78 |
| 4.11 | สรุปผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่วัดโดยวิธีวานเดอร์พาว.....83 |
| 4.12 | สรุปผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่วัดโดยวิธีฮอลล์บาร์.....83 |

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 การเปลี่ยนแปลงของพาหะอิสระที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วงต่างๆ..... | 10 |
| 2.2 แสดงกลไกย่อยและกลไกรวมที่เกิดขึ้นภายใน GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 14 |
| 2.3 ปฏิกิริยาการนำฮอลล์บนแผ่นสารตัวอย่าง..... | 16 |
| 2.4 รูปทรงสารตัวอย่างแบบฮอลล์บาร์ชนิด 6 และ 8 แขน..... | 19 |
| 2.5 สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใดๆ..... | 20 |
| 2.6 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ F และ ค่า q | 21 |
| 2.7 สารตัวอย่างที่มีขั้วสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน..... | 23 |
| 2.8 รูปทรงมาตรฐานสำหรับเทคนิคการวัดแบบวานเดอร์พาว..... | 24 |
| 2.9 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าลักษณะต่างๆ..... | 25 |
| 2.10 การเปลี่ยนแปลงบริเวณรอยต่อของ In และ GaAs หลังการแอนนีส..... | 26 |
| 3.1 ระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์พื้นฐาน..... | 27 |
| 3.2 ไดอะแกรมระบบวัดที่ได้รับการปรับปรุง..... | 28 |
| 3.3 รูปทรงของสารตัวอย่างที่ใช้ทำการวัด..... | 30 |
| 3.4 ไดอะแกรมระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์..... | 34 |
| 3.5 สวิตช์เลือกแบบไบนารีและตารางตรรก | 35 |
| 3.6 วงจรสวิตช์ควบคุมการวัด..... | 36 |
| 3.7 ไดอะแกรมวงจรจ่ายกระแสคงที่..... | 37 |
| 3.8 วงจรเปรียบเทียบของการวัดแบบวานเดอร์พาว..... | 39 |
| 3.9 ไดอะแกรมวงจรควบคุมแม่เหล็ก..... | 40 |
| 3.10 ไดอะแกรมวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 42 |
| 3.11 ห้องวัดอุณหภูมิต่ำ..... | 43 |
| 3.12 โครงสร้างของโปรแกรมควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์..... | 46 |
| 3.13 ไดอะแกรมโปรแกรมวัดแบบให้ผู้ใช้วัดเอง..... | 47 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.14 โปรแกรมควบคุมการวัดแบบอัตโนมัติ..... | 49 |
| 4.1 วงจรตัวต้านทาน..... | 53 |
| 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานที่วัดได้โดยไม่มีกรปรับแก้ และค่าตัวต้านทาน..... | 55 |
| 4.3 กราฟแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลสภาพต้านทานเปรียบเทียบกับผลการวัดปกติ | 56 |
| 4.4 แนวตัดสารตัวอย่างจากแผ่น GaAs หรือ InSb..... | 57 |
| 4.5 สารตัวอย่างหลังการติดขั้วไฟฟ้า In..... | 58 |
| 4.6 ระบบแอนนีส GaAs..... | 59 |
| 4.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานชั่วคราวตามอุณหภูมิ..... | 60 |
| 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานชั่วคราวตามอุณหภูมิ เมื่อแอนนีสด้วยอุณหภูมิแอนนีสต่างกัน..... | 61 |
| 4.9 แนวการวางขูดขั้วไฟฟ้าลงบนขั้วสารตัวอย่าง GaAs..... | 63 |
| 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนจากการวัดสภาพต้านทาน และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับระยะทาง..... | 65 |
| 4.11 รูปทรงของสารตัวอย่าง GaAs ทั้ง 5 ชุด..... | 66 |
| 4.12a แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า จากวิธีวานเดอร์พาวและวิธีฮอลล์บาร์..... | 67 |
| 4.12b แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ จากวิธีวานเดอร์พาวและวิธีฮอลล์บาร์..... | 67 |
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง GaAs และอุณหภูมิ..... | 72 |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของสารตัวอย่างGaAs และอุณหภูมิ..... | 72 |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะของสารตัวอย่าง GaAs และอุณหภูมิ..... | 73 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าตามอุณหภูมิของ InSb..... | 76 |
| 4.16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ตามอุณหภูมิของ InSb..... | 77 |
| 4.16 แสดงความเข้มพาหะอิสระของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 78 |
| 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μ_n และ $T^{-1/2}$ | 79 |
| 4.20 รูปทรงของฟิล์มบาง CuInSe ₂ ที่เตรียมได้..... | 80 |
| 4.21 แสดงการกระจายความหนาแน่นของเนื้อฟิล์ม (#AA2,#AC2)..... | 81 |
| 4.22 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AA2..... | 84 |
| 4.23 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AC2..... | 85 |
| 4.24 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AD2..... | 86 |
| 4.25 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AA5..... | 87 |
| 4.26 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AC5..... | 88 |
| 4.27 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AD5..... | 89 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 1

บทนำ

ในการวิจัยพัฒนาและศึกษาศาสตร์กึ่งตัวนำ กระบวนการสำคัญที่ขาดไม่ได้คือกระบวนการวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะ การนำสารกึ่งตัวนำไปใช้มักเป็นไปในแง่ของการใช้ประโยชน์จากสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ สมบัติไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้ค่อนข้างสะดวกและใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างภายในเนื้อสารได้เป็นอย่างดี ค่าสมบัติไฟฟ้าทั้งสองชนิดนี้สามารถวัดได้จากหลายวิธี การวัดจากปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นวิธีวัดวิธีหนึ่งที่ทำให้ทราบสมบัติไฟฟ้าทั้งสองได้และเรียกสภาพเคลื่อนที่ได้ที่วัดได้จากวิธีนี้ว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (Hall mobility) ซึ่งมีการนำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ไปใช้ในการศึกษาศาสตร์กึ่งตัวนำต่างๆอย่างกว้างขวางเช่น GaAs [1] เป็นต้น เนื่องจากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นวิธีวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าของสารที่มีศักยภาพมากวิธีหนึ่ง ในการเตรียมสารกึ่งตัวนำใดๆเราจึงตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการเตรียมโดยวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถทำได้โดยตรงจากทฤษฎีวัดของฮอลล์ [2] หรือวิธีวานเดอร์พาว [3] ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดแบบพื้นฐาน อย่างไรก็ตามได้มีการนำแนวคิดจากระบบวัดพื้นฐานทั้งสองแบบนี้ไปประยุกต์และพัฒนาระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังที่มีการรายงานผลงานวิจัยจากที่ต่างๆเช่น ระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติที่ควบคุมการวัดด้วยวงจรไฟฟ้า [4] หรือระบบวัดแบบอัตโนมัติที่ควบคุมการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ [5] จากการศึกษารายละเอียดของงานวิจัยเหล่านี้ พบว่ามีหลักการวัดคล้ายกันคือใช้ระบบสวิตช์ช่วยควบคุมการวัด และควบคุมการทำงานของระบบสวิตช์นี้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีเหล่านี้ช่วยให้การวัดข้อมูลจากสารตัวอย่างทำได้หลายรูปแบบ และได้ค่าจำนวนข้อมูลต่อหนึ่งค่าเฉลี่ยสูงมาก ในงานวิจัยนี้จะได้สร้างและพัฒนาระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยอาศัยแนวคิดของงานวิจัยเหล่านี้

ขีดความสามารถของระบบวัดที่ต้องการสำหรับงานวิจัยนี้คือ

- 1 ควบคุมการวัดโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำให้การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์มีความสะดวก ,ความคล่องตัว และมีความถูกต้องมากขึ้น
- 2 วัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากสารตัวอย่างที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงและพวกฟิล์มบางได้ดี
- 3 วัดสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำหรือต่ำมากได้ดี
- 4 ดำเนินกระบวนการวัดได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบผู้ใช้ควบคุมการวัดเอง
- 5 ดำเนินกระบวนการวัดได้ทั้งเทคนิคของฮอลล์หรือเทคนิคของวานเดอร์พาว
- 6 ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการพัฒนาในภายหลัง

จุดประสงค์ของงานวิจัยเป็นดังนี้

- 1 สร้างระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาและการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ ซึ่งควบคุมการทำงานได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบที่ผู้ใช้ดำเนินการวัดเองได้และให้ความสะดวกกับผู้ใช้ในกรณีที่ทำการวัดสารตัวอย่างจำนวนมาก
- 2 เพื่อวิจัยและพัฒนาระบบสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง
- 3 ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสารตัวอย่าง GaAs ,InSb และ CuInSe₂ ที่สภาวะต่างๆ เช่น เช่นที่อุณหภูมิต่ำ

ขั้นตอนและเนื้อหาของงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปรากฏการณ์ฮอลล์ เช่น ความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำในสภาวะต่างๆ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือภายในระบบที่มีศูนย์กลางการกระเจิงชนิดต่างๆ ซึ่งจะทำให้ทราบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า,สภาพเคลื่อนที่ได้และความหนาแน่นพาหะมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 หลังจากนั้นจะได้ศึกษารายละเอียดของเทคนิคการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคการวัดโดยทฤษฎีของฮอลล์และทฤษฎีของวานเดอร์พาว และในตอนท้ายของบทที่ 2 จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับขั้วสัมผัสซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในการวัดสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ส่วนของการออกแบบระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 3 โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนในส่วนแรกจะได้กล่าวถึงแนวคิดพื้นฐานของระบบวัดที่ได้รวมการวัดด้วยเทคนิคของฮอลล์และเทคนิคของวานเดอร์พาวเข้าไว้ด้วยกันพร้อมทั้งแสดงการประมวลผลการวัดจากระบบ

ดังกล่าวในรูปแบบต่างๆ ในส่วนต่อมาจะกล่าวถึงการออกแบบระบบวัดและส่วนประกอบต่างๆ ทั้งฮาร์ดแวร์และโปรแกรมควบคุมระบบวัดพร้อมทั้งกล่าวถึงวิธีใช้ระบบวัดในตอนท้าย

ในส่วนของการทดลองซึ่งกล่าวถึงในบทที่ 4 ประกอบด้วยการตรวจสอบระบบวัดในเบื้องต้นและศึกษาเทคนิคการทำขั้วไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่างก่อนการวัด หลังจากนั้นจะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดจากเทคนิคของฮอลล์และเทคนิคของวานเดอร์พาว ในส่วนต่อมาจะเริ่มใช้ระบบวัดศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสารตัวอย่าง GaAs ,InSb และ CuInSe₂ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ เช่น ที่ อุณหภูมิต่ำเป็นต้น และสรุปผลการวัดในบทที่ 5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 2

สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์

สสารสามารถจำแนกตามสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 กลุ่มคือ สารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า, สารกึ่งตัวนำและฉนวนไฟฟ้า ภายใต้สนามไฟฟ้าที่กระทำจากภายนอก กระบวนการนำไฟฟ้าในฉนวนและตัวนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระชนิดเดียวกันคืออิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำพาหะอิสระที่เป็นตัวเคลื่อนที่มีได้สองชนิดคือ อิเล็กตรอน (electron) และโฮล (hole)

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [6,7]

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำหรือจำนวนโฮลในแถบวาเลนซ์เพิ่มขึ้น สารกึ่งตัวนำตัวนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างพลังงาน (energy gap), ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนและอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะตามระดับพลังงานของผลึกเป็นไปตามการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ด้วยฟังก์ชัน

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E-E_F)/kT]+1} \quad (2.1)$$

$f(E)$ คือ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงที่โบลซ์มาน (Boltzmann constant)

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีสารกึ่งตัวนำที่ไม่ได้รับการเติมสิ่งเจือปน (intrinsic semiconductor) และกรณีที่เติมสิ่งเจือปน (extrinsic semiconductor)

1. สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก

ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิกอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบเวเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_c(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ที่อุณหภูมิใดๆคือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.2)$$

เมื่อ $N_c(E)$ คือความหนาแน่นของสถานะในแถบนำซึ่งพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว ดังนั้น

$$N_c(E) = 2\pi\left(\frac{2m_e^*}{h^2}\right)^{3/2}E^{1/2} \quad (2.3)$$

m_e^* = มวลยังผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำ

h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)

สมการ 2.3 พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_i &= \int_0^{E_t} n(E)dE \\ &= \int_0^{E_t} N_c(E)f(E)dE \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ E_t คือขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าช่องว่างของแถบพลังงาน (energy gap) ของผลึกมากๆ จนแน่ใจได้ว่าพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะไม่มีดีเจนเนอเรซี (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการ 2.4 จึงสามารถขยายขอบเขต E_t ออกไปถึงอนันต์ และเขียนได้ใหม่เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^\infty \frac{E^{1/2}}{\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)+1} dE \quad (2.5)$$

เนื่องจาก $\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right) \gg 1$ นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.6)$$

$$\text{เมื่อ } N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.7)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบเวเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F+E_g}{kT}\right] \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.9)$$

E_g คือ ช่องว่างของแถบพลังงาน $= E_c - E_v$

และ m_h^* คือ มวลยังผล (effective mass) ของโฮลในแถบเวเลนซ์

เนื่องจากในสารอินทรีนสิก โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากันจากสมการ 2.6 และ 2.8 จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.10)$$

$$\text{และ } n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.11)$$

$$\text{หรือ } n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e m_h}{m^2}\right)^{3/4} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.12)$$

จะสังเกตจากสมการ 2.12 ได้ว่าพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเชิงเอกซโปเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารอินทรีนสิก

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินสิค

เมื่อมีการเติมสิ่งเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (Donor) หรืออะตอมผู้รับ (Acceptor) ในสภาวะสมดุลย์ความร้อนของผลึกความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารอินทรินสิค นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.13)$$

และความหนาแน่นโฮลในแถบเวเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.14)$$

ภายใต้สภาวะไม่มีดีเจนเนอเรซีเรายังคงมีความสัมพันธ์

$$np = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] = n_i^2 \quad (2.15)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำแบบ n-type ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำ E_d และอะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบบนของแถบเวเลนซ์ E_a จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.16)$$

n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

ที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีคือ

1. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้จะต่อมของสิ่งเจือปนจะถูกไอโอไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือมาจากสารอินทรินสิกและมาจากอะตอมของสิ่งเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ 2.16 ลดรูปเป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15 จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2}[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}] \quad (2.18)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.19)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารอินทรินสิกมากกว่าอะตอมสิ่งเจือปนมาก ๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการ 2.18 และ 2.19 จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.20)$$

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารอินทรินสิกจะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสิ่งเจือปนมาก ๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าช่วงอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ 2.18 จะกลายเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.21)$$

2. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอโอไนซ์อะตอมสิ่งเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก สมการ (2.16) จะกลายเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.22)$$

$$\text{และ } n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{-\frac{E_d + E_F}{kT}\right\}} \right] \quad (2.23)$$

β คือ แฟกเตอร์ดีเจเนอเรซี (degeneracy factor) ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการ 2.13, 2.22 และ 2.23 สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.24)$$

$$\text{เมื่อ } N'_c = \beta N_c \exp\left\{-\frac{E_d}{kT}\right\} \quad (2.25)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{1}{2}[(N_a + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)]^{1/2} \quad (2.26)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ แล้ว N'_c จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการ 2.26 เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมไบนอมิเยล (Binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N'_c}{2}\right) + \frac{1}{2}(N_a + N'_c) + \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} + \dots$$

$$n \cong \frac{N'_c(N_d - N_a)}{N_a + N'_c} \quad (2.27)$$

ถ้า $N_a \gg N_c'$ สมการ 2.27 จะกลายเป็น

$$n = \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.28)$$

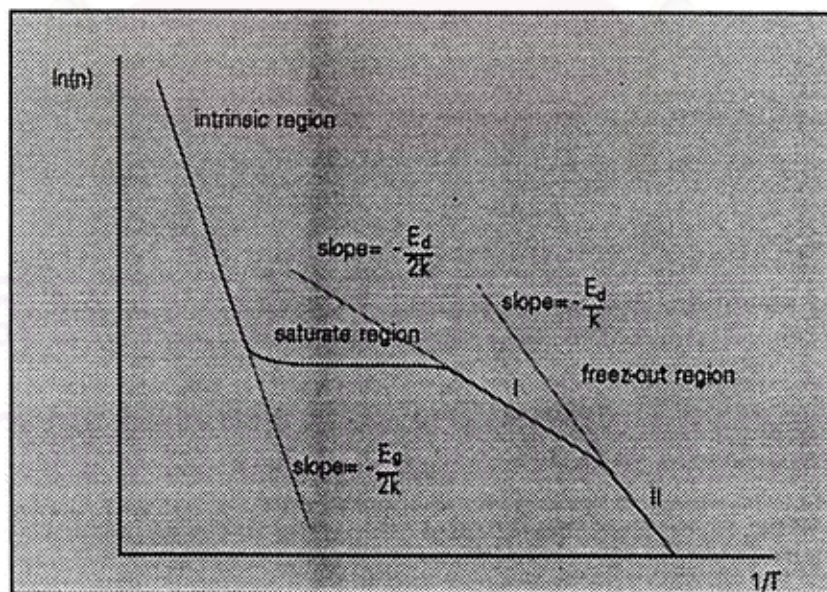
ถ้า N_a มีค่าน้อยมาก นั่นคือ $N_d \gg N_c' \gg N_a$ และสมการ 2.24 จะลดรูปลง
ได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N_c' = 0$$

$$\text{หรือ } n \approx \sqrt{\beta N_d N_c'} \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right) \quad (2.29)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นพาหะอิสระจะลดลงตามการลดของอุณหภูมิในเชิงเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าช่วง ฟรีซเอาท์ (freez-out region) โดยจะมีการลดลงตามสมการ 2.29 เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการ 2.28 เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$ [9]

ผลการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจากอิเล็กตรอนอิสระในช่วงอุณหภูมิต่างๆแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงของพาหะอิสระที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วงต่างๆ

สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) และสภาพเคลื่อนที่ได้ (Mobility) [10]

ในสารที่มีโครงสร้างเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์แบบ (perfect crystalline material) การเคลื่อนที่ของพาหะเป็นไปอย่างอิสระ สนามไฟฟ้าภายนอก(E)จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่นั่นคือ

$$m_e \frac{dv}{dt} = eE \quad (2.30)$$

แต่สำหรับโครงสร้างผลึกของสารทั่วไปจะมีความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกรูปแบบต่างๆ เช่น สารเจือปน, โครงผลึกที่เสียรูป และการสั่นของโครงผลึก (โฟนอน) เจือปนอยู่ การชนเข้าสิ่งเหล่านี้ย่อมทำให้ความเร็วของการเคลื่อนที่ของพาหะถูกจำกัด ที่สภาวะคงตัว (steady state) ความเร็วเฉลี่ยของพาหะคือ

$$\langle v \rangle = eE \frac{\tau}{m_e} \quad (2.31)$$

τ คือระยะเวลาอิสระเฉลี่ยของการชน (mean free time) หรือ เวลาผ่อนคลาย (relaxation time)

และด้วยนิยามความหนาแน่นกระแส $J = ne\langle v \rangle$ จะได้

$$J = \frac{ne^2 \tau}{m_e} E \quad (2.32)$$

นี่คือกฎของโอห์มซึ่งนิยามโดย $J = \sigma E$, σ คือสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) และนิยามสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) (ρ) ว่าเป็นส่วนกลับของสภาพการนำไฟฟ้า จะได้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{ne^2 \tau} \quad (2.33)$$

พิจารณาสมการ 2.31 ความเร็วเฉลี่ย $\langle v \rangle$ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้า นั่นคือ

$$\langle v \rangle = \mu E \quad (2.34)$$

และ

$$\mu = \frac{e\tau}{m_e} \quad (2.35)$$

μ คือสภาพเคลื่อนที่ได้ (mobility) โดยนิยามว่าเป็นความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าขนาดหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็น $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ซึ่งเป็นจริงเมื่อสนามไฟฟ้าที่มาจากภายนอกมีค่าไม่มาก ($E < 1\text{kv}/\text{cm}$) และเรียกสภาพเคลื่อนที่ได้ จาก 2.35 ว่า conductivity mobility

สาระสำคัญของค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ อยู่ที่กลไกการกระเจิงของพาหะกับ ความไม่สมบูรณ์ในผลึกดังกล่าวข้างต้น ที่ควบคุมโดยค่าเฉลี่ยของเวลาอิสระเฉลี่ย $\langle \tau \rangle$ ในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำแบบไม่มีดีเจนเนอเรซี (non-degenerate) ค่าเวลาอิสระเฉลี่ยจะขึ้นกับพลังงานของพาหะอิสระ (E) ด้วยหลักการกระจายของโบลซ์มาน (Boltzmann distribution) ดังนั้นที่อุณหภูมิ T ค่าเฉลี่ยของ τ คือ [10]

$$\langle \tau(E) \rangle = \frac{\int_0^\infty \tau(E) E^{3/2} \exp(-E/kT) dE}{\int_0^\infty E^{3/2} \exp(-E/kT) dE} \quad (2.36)$$

สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งๆ อาจมีกลไกการกระเจิงของพาหะได้หลายแบบเกิดขึ้นได้ โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งทำให้ระยะเวลาอิสระเฉลี่ยแปรเปลี่ยนไปได้ด้วยรูปแบบต่างๆ กันซึ่งส่งผลโดยตรงกับสภาพเคลื่อนที่ได้ ความสัมพันธ์ของสภาพเคลื่อนที่ได้และระยะเวลาอิสระเฉลี่ยกับอุณหภูมิของการกระเจิงแต่ละแบบได้มีการศึกษาและรวบรวมไว้ในตาราง 2.1

อย่างไรก็ตาม เราสามารถประมาณผลรวมของแต่ละกลไกย่อยๆ เหล่านี้ด้วยกฎของ Matthiesen [11] โดย

$$\langle \tau \rangle = \left\langle \frac{1}{\tau_1^{-1} + \tau_2^{-1} + \tau_3^{-1} + \dots} \right\rangle \quad (2.37)$$

หากประมาณว่า τ , คงที่ ดังนั้น

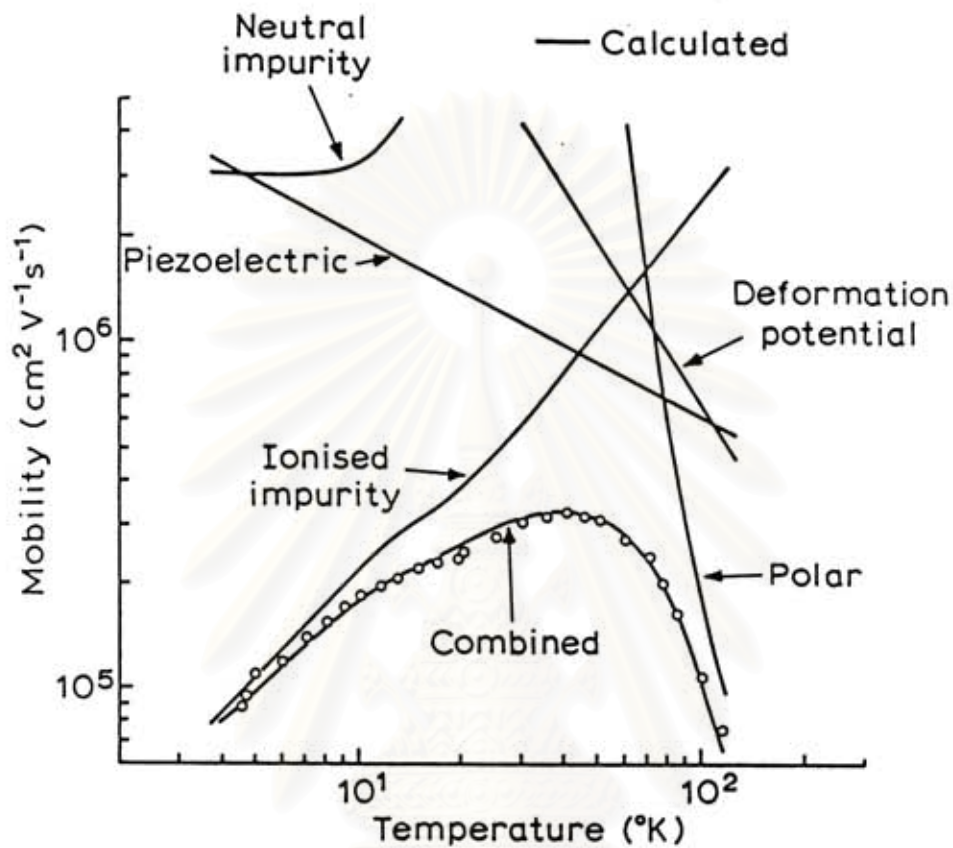
$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} + \dots \\ \text{และ} \quad \frac{1}{\mu} &= \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_3} + \dots \end{aligned} \quad (2.38)$$

ตัวอย่างสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการศึกษาอย่างกว้างคือ GaAs[10] ซึ่งมี ionized impurity scattering เป็นกลไกเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ ($T < 15\text{K}$) , ในอุณหภูมิช่วงกลาง ($15\text{K} < T < 40\text{K}$) มี piezoelectric scattering เป็นกลไกที่เด่น และในช่วงอุณหภูมิสูง ($T > 40\text{K}$) กลไกที่เด่นคือ polar optical phonon scattering และผลรวมของกลไกย่อยๆ เหล่านี้แสดงออกในรูปของสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะที่ขึ้น

| scattering mechanism | Relaxation time | Conductivity mobility |
|-----------------------|---|---|
| Neutral impurity | $\tau = \frac{m^*}{20N_n h a_0}$ | $\mu = \frac{e}{20N_n h a_0}$ |
| Ionized impurity | $\tau = \frac{16 \sqrt{2} m^* \pi \epsilon^2 E^{3/2}}{N_i Z^2 e^4} \cdot \frac{E^{3/2}}{[\ln(1+4k^2 \lambda^2) - \frac{4k^2 \lambda^2}{1+4k^2 \lambda^2}]}$ | $\mu = \frac{128 \sqrt{2} \pi \epsilon^2 (k_B T)^{3/2}}{N_i Z^2 e^4} \cdot \ln[1 + (\frac{28 \pi k_B T}{2Z e^2 N_c^{1/3}})^2]^{-1}$ |
| Deformation potential | $\tau = \frac{\pi \rho h^4 s^2 E^{-1/2}}{2E_2^1 (m^*)^{3/2} k_B T}$ | $\mu = \frac{2 \sqrt{2} \pi \rho h^4 s^2 e }{3E_2^1 (m^*)^{5/2} (k_B T)^{3/2}}$ |
| Piezoelectric | $\tau = \frac{2 \sqrt{2} \pi \rho h^2 s^2 e^2 E^{1/2}}{(eh_{pz})^2 (m^*)^{1/2} k_B T}$ | $\mu = \frac{16 \sqrt{2} \rho h^2 s^2 e^2 e }{3(eh_{pz})^2 (m^*)^{3/2} (k_B T)^{1/2}}$ |
| Polar optical phonon | - | $\mu_{po} = 1.04 \times 10^5 \cdot \frac{\sqrt{T} (e^{T_{po}/T} - 1) \chi(T_{po}/T)}{T_{po}}$ |

ตารางที่ 2.1 ค่าเวลาอิสระเฉลี่ยและสภาพเคลื่อนที่ได้จากกลไกการกระเจิงชนิดต่างๆ [10]

กับอุณหภูมิได้แสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกลไกย่อยและกลไกรวมที่เกิดขึ้นภายใน GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ

นอกจาก Conductivity mobility แล้วยังมีสภาพเคลื่อนที่ได้ชนิดอื่นๆเช่น Hall mobility ที่พิจารณาจากปรากฏการณ์ฮอลล์, Physical magnetoresistance mobility และ geometrical magnetoresistance mobility ที่พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานของสารที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเฉพาะ Hall mobility เท่านั้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall effect) [2,12]

จากสมการที่ 2.33 และ 2.35 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพเคลื่อนที่ได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.39)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.40)$$

เมื่อ n_e และ n_p คือ ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

และ μ_e และ μ_p คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน และ โฮล ตามลำดับ

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพเคลื่อนที่ได้เราจะคำนวณความหนาแน่นพาหะข้างมากได้จากสมการ 2.39 คือ

$$n \cong \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad \text{กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N} \quad (2.41)$$

$$\text{และ } p \cong \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad \text{กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P} \quad (2.42)$$

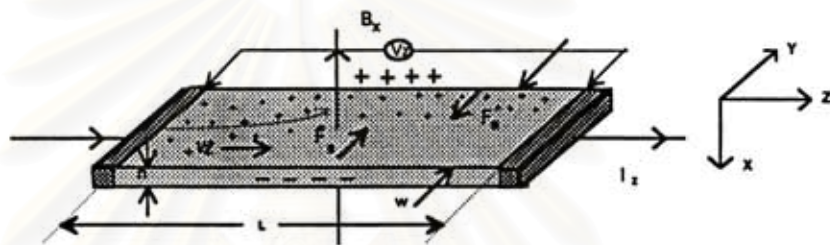
เราสามารถทราบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า,สภาพเคลื่อนที่ได้จากหลายวิธี วิธีที่สะดวก และใช้กันอย่างกว้างขวางคือวัดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้รับการค้นพบในปี1879 โดย E.H.Hall ในขณะที่กำลังศึกษาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นบนโลหะที่มีกระแสไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็ก เมื่อทำการวัดความต่างศักย์ในแนวขวางเขาสังเกตได้ว่ามีกระแบบีงเบนแนวการไหลของกระแสโดยสนามแม่เหล็กไปในแนวด้านข้างของโลหะ เมื่อประยุกต์ใช้กับสารกึ่งตัวนำ สามารถใช้อธิบายสมบัติไฟฟ้าเกี่ยวกับสภาพเคลื่อนที่ได้ของสารได้ดี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำแบบ P ที่เป็นรูปทรงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว X หรืออาจมองว่ามีกลุ่มโฮลไหลไปทางขวาด้วยความเร็ว V_z กระแสที่ไหลผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำเขียนได้ในเทอมของ

$$I = qpwhv_z \quad (2.43)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_Z) ระหว่างปลายทั้งสอง สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจาก

$$\rho = \frac{V_Z \cdot wh}{I \cdot L} \quad (2.44)$$



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาฮอลล์บนแผ่นสารตัวอย่าง

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กที่กระทำกับชิ้นสารในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปด้วยแรงลอเรนซ์

$$F = q(v_z \times B_x) + E_y \quad (2.45)$$

กลุ่มโฮลที่ถูกเบี่ยงจะสะสมในบริเวณขอบด้านใน และหากไม่มีการเสียประจุในแนว y จนกระทั่งการสะสมประจุเข้าสู่สมดุล ซึ่งสนามไฟฟ้า (E_y) หรือสนามฮอลล์ที่เกิดขึ้น ในสภาวะคงตัวนี้คือ

$$E_y = v_z B = \frac{1}{qp} \cdot \frac{I}{wh} \cdot B \quad (2.46)$$

หากพิจารณาสมการ 2.46 จะเห็นว่า สนามฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H J_z \cdot B \quad (2.47)$$

$$\text{เมื่อ } R_H = \frac{E_y}{J_z B} = \frac{1}{qp} \quad (2.48)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์(Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากกระแสพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย ในสภาวะที่มีทั้งโฮลและอิเล็กตรอนในปริมาณใกล้เคียงกัน สัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีนี้คือ

$$R_H = \frac{[(p-b^2n)+(\mu_n B)^2(p-n)]}{q[(p+bn)^2+(\mu_n B)^2(p-n)^2]} \quad (2.49)$$

เมื่อ $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ สัมประสิทธิ์ฮอลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นแม่เหล็กเป็นสำคัญ ในขอบเขตสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำ ($B \ll 1/\mu_n$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์มีค่า

$$R_H \cong \frac{(p-b^2n)}{q(p+bn)^2} \quad (2.50)$$

$$\text{หรือ } R_H \cong -\frac{1}{n_i q} \frac{(b-1)}{(b+1)} \quad \text{เมื่อ } n \cong p \cong n_i \quad (2.51)$$

และในขอบเขตสนามความเข้มสูง ($B \gg 1/\mu_n$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์มีค่า

$$R_H \cong \frac{1}{q(p-n)} \quad (2.52)$$

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามฮอลล์ตลอดความกว้างของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qp} \frac{IB}{wh} dy \\ &= \frac{1}{qp} \frac{IB}{h} \end{aligned} \quad (2.53)$$



สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัดคือ $R_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{h}{B}$ (m³/c) (2.54)

ความเข้มข้นของโฮลตามนิยามคือ $p = \frac{1}{qR_H} = \frac{I}{V_H} \cdot \frac{B}{qh}$ (2.55)

โดยทั่วไปกลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะซึ่ง

$$\tau = \tau(E) \quad (2.56)$$

เมื่อคิดผลจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะเขียนได้ในรูปของ

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (\text{กรณี p - type}) \quad (2.57)$$

และ $R_H = \frac{r}{nq} \quad (\text{กรณี n - type}) \quad (2.58)$

เมื่อ r คือ ตัวประกอบฮอลล์(Hall scattering factor) ซึ่งได้นิยามจากสมการ

$$r = \frac{\langle v^2 \rangle}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.59)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกจะมีค่า $r = 3\pi/8 = 1.18$ หรือ การกระเจิงเนื่องจากสารเจือปนที่ไอโอไนซ์ มี $r = 315\pi/512 = 1.93$ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ และมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \quad (2.60)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 G r ในช่วงนี้เปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งอาจประมาณได้ว่าคงที่

จาก สมการ 2.39 และ 2.57 นิยามสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์(μ_H)โดย

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r\mu \quad (2.61a)$$

หรือ
$$\mu_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{h}{B} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.61b)$$

สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์แตกต่างจากสภาพเคลื่อนที่ได้จากการนำไฟฟ้า (conductivity mobility) ด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความเข้มข้นพาหะ จึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความเข้มข้นที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์จึงอาจเรียกว่าเป็น Hall carrier concentration ซึ่งอาจสูงกว่าความเข้มข้นที่แท้จริงถึง 30 %

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยสารตัวอย่างรูปทรงดังรูป 2.3 อาจเกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนของการวัดความต่างศักย์ และขีดจำกัดทางขนาด เนื่องจากขั้วสัมผัสเชื่อมโดยตรงกับส่วนของเนื้อสาร ในทางปฏิบัติรูปทรงของสารตัวอย่างที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์มีได้ 2 ลักษณะคือ

-แบบแท่ง รูปทรงที่ประยุกต์จากรูปที่ 2.3 โดยเพิ่มแขนสำหรับวางขั้วไฟฟ้าซึ่งอาจมีได้ 6 หรือ 8 แขน เรียกการวัดสารตัวอย่างด้วยรูปทรงลักษณะนี้ว่า เทคนิคการวัดแบบฮอลล์บาร์ (Hall bar technique) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปทรงสารตัวอย่างแบบฮอลล์บาร์ชนิด 6 และ 8 แขน

-แบบแผ่น ชิ้นสารเป็นรูปทรงแผ่นแบบใดๆ ที่สมมาตร มีเนื้อสม่ำเสมอและไม่มีรูในขอบเขตของแผ่นสาร เช่น แผ่นกลม หรือ แผ่นสี่เหลี่ยม การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า van de Pauw technique เป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและเตรียมรูปทรงของชิ้นสารได้ง่าย เทคนิคนี้จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคของวานเดอร์พาว [3]

เทคนิคได้รับการพัฒนาขึ้นจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ conformal mapping โดยวานเดอร์พาว (van de Pawl) สำคัญสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1 ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
- 2 ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
- 3 สารตัวอย่างต้องมีความหนาเท่ากันตลอด
- 4 เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปร่างแบนแบนใดๆและมีขั้วสัมผัสเล็กๆ 1,2,3,4 กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.5 สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใดๆ

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าและออกที่ขั้ว 1,2 และ วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 3,4 และนิยาม

$$R_{1234} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (2.62)$$

ทำนองเดียวกันเมื่อจ่ายกระแสเข้าและออกทางขั้ว 2,3 และวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 4,1 นิยาม

$$R_{2341} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (2.63)$$

จากการนิยามข้างต้น(สมการ 2.62 และ 2.63) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนได้ในรูปฟังก์ชันดังนี้

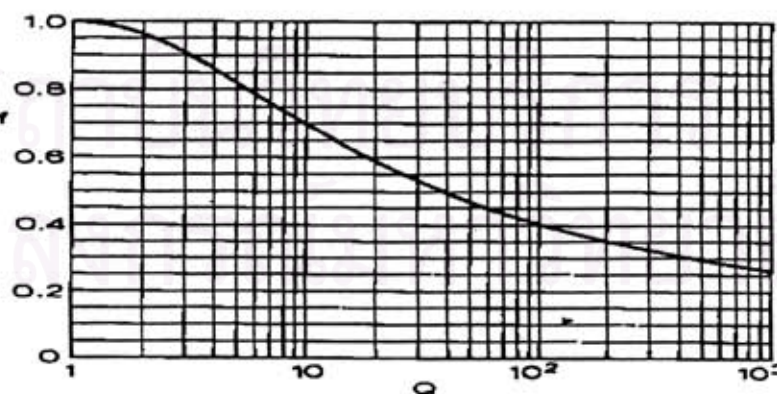
$$\exp\left[-\frac{\pi R_{1234} W}{\rho}\right] + \exp\left[-\frac{\pi R_{2341} W}{\rho}\right] = 1 \quad (2.64)$$

โดยการใช้ความรู้เกี่ยวกับ Conformal mapping ของสนามไฟฟ้าในสองมิติ วนเดอร์พาวได้พิสูจน์ว่าสมการ 2.64 ยังคงเป็นจริงสำหรับแผ่นสารรูปร่างใดๆ และหากทราบ W, R_{1234} และ R_{2341} ก็สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสมการ 2.64 อาจลดรูปได้เป็น

$$\rho = \frac{\pi W}{\ln 2} \left[\frac{R_{1234} + R_{2341}}{2} \right] f\left(\frac{R_{1234}}{R_{2341}}\right) \quad (2.65)$$

f คือ ค่าปรับแก้ (correction factor) ที่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนของ $Q = R_{1234}/R_{2341}$ ด้วยความสัมพันธ์

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{\ln 2} \cosh^{-1} \left[\frac{1}{2} \exp\left(\frac{\ln 2}{f}\right) \right] \quad (2.66)$$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ F และ ค่า q

ค่าปรับแก้จะมีค่ามากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความถี่สมมาตรทางไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งอยู่ในเทอมของ Q ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้และ Q แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 2.6 ในกรณีที่มีแผ่นสารมีรูปทรงสมมาตรตามแนวแกนขั้วไฟฟ้า 1,3 และ 2,4 แล้วจะได้

$$R_{1234} = R_{2341} \quad \text{และ} \quad F = 1$$

จากสมการที่ 1.65 สภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีดังกล่าวคือ

$$\rho = \frac{\pi W}{\ln 2} \cdot R_{1234} \quad (2.67)$$

เงื่อนไขเช่นนี้โดยทั่วไปถือว่าเป็นลักษณะการวัดที่ดี และให้ผลการวัดที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นได้หากเลือกตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมบนชิ้นสาร หรือเลือกรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นสารที่เหมาะสมเช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปทรงกลม, รูปกากบาทหรือรูปเป็นต้น รูปทรงแต่ละแบบให้ความเหมาะสมกับการวัดที่แตกต่างกัน เช่นการเลือกรูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมักเหมาะสมกับการศึกษาสารพวก Bulk เนื่องจากการง่ายต่อการเตรียม ในขณะที่รูปทรงกลม, รูปกากบาทหรือรูปใบไม้ไม่เหมาะกับการวัดสารจำพวกฟิล์มบางหรือสารพวกที่สามารถเตรียมรูปร่างด้วยวิธี Photolysis ได้ง่าย

ในกรณีของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทะแยงมุมขั้ว 1,3 และวัดความต่างศักย์จากขั้ว 2,4 ที่เหลือ

นิยาม $R_{1324} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (2.68)$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของวานเดอร์พาว คือ

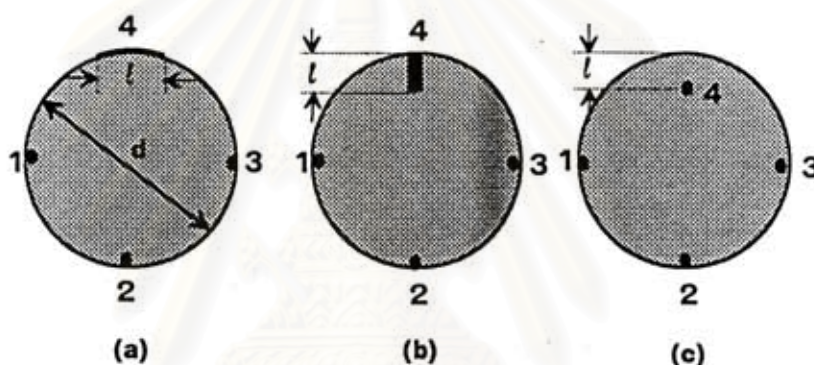
$$R_H = \frac{d}{B} \cdot \Delta R_{1324} \quad (2.69)$$

เมื่อ ΔR_{1324} คือผลต่างระหว่าง ค่า R_{1324} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

สภาพเคลื่อนที่ของฮอลล์ค่านวนได้จาก

$$\mu = \frac{RH}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \cdot \Delta R_{1324} \quad (2.70)$$

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด พิจารณาชิ้นสารแผ่นรูปจานกลมใน 3 กรณี ซึ่งมีตำแหน่งการวางขั้วสัมผัสต่างๆ กันดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สารตัวอย่างที่มีขั้วสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

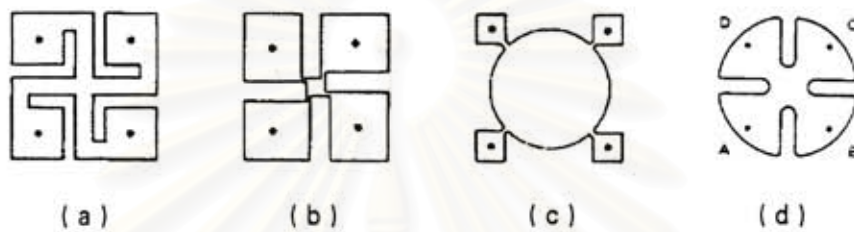
วานเดอร์พาวได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดทั้งสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ดังต่อไปนี้

| error | A | B | C |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $\frac{\Delta\rho}{\rho} \cong$ | $-\frac{l^2}{16 \ln(2)d^2}$ | $-\frac{l^2}{4 \ln(2)d^2}$ | $-\frac{l^2}{2 \ln(2)d^2}$ |
| $\frac{\Delta\mu}{\mu} \cong$ | $-\frac{2l}{\pi d^2}$ | $-\frac{4l}{\pi d^2}$ | $-\frac{2l}{\pi d}$ |

ตารางที่ 2.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีต่างๆ

ถ้า l มีค่า $0.06d$ ความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทานรวมทั้งสี่ขั้วจาก a,b,c จะมีค่าตั้งแต่ 1% ,4% และ 8% ซึ่งจะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนของการวัดขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเส้นขอบของ

ขั้วสัมผัสเป็นสำคัญ ในทางปฏิบัติการหลีกเลี่ยงปัญหาเช่นนี้อาจทำได้โดยเพิ่มส่วนที่เป็นกึ่งแขนง ออกไปดังรูปที่ 2.8 a-c กึ่งแขนงทำให้พื้นที่ขั้วสัมผัสมีมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ทำหน้าที่เป็นขั้วสัมผัสอุดมคติบนของแผ่นสารบริเวณเล็กๆได้อย่างดี หรืออาจทำให้รูปทรงหยักไปมาดังรูปที่ 2.8d ซึ่งเรียกว่ารูป cover-leaf ซึ่งทำให้อัตราส่วนความยาวเส้นขอบต่อขนาดของขั้วสัมผัสมีมากขึ้น



รูปที่ 2.8 รูปทรงมาตรฐานสำหรับเทคนิคการวัดแบบววนเดอร์พาว

ขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก [13]

ความถูกต้องของการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นอกจากจะขึ้นอยู่กับวิธีการวัดและรูปทรงของชิ้นสารแล้วสิ่งสำคัญประการหนึ่งอีกประการคือ การทำขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก(ohmic contact) คำจำกัดความของขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก อาจมีหลายแบบซึ่งสรุปเป็นข้อสำคัญคือ

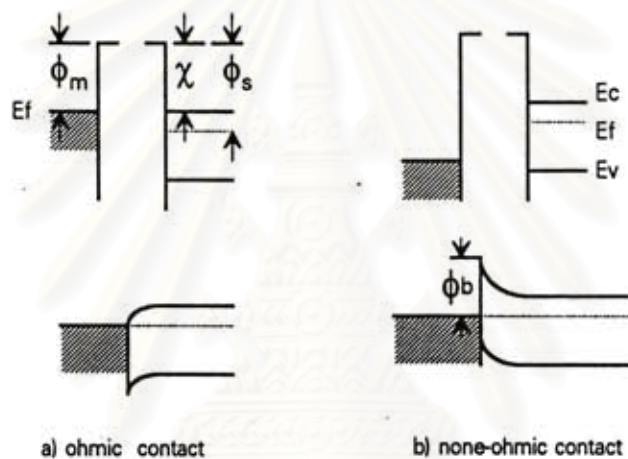
- 1 เป็นแหล่งจ่ายหรือแหล่งรับพาหะทั้งสองชนิดอย่างสมบูรณ์
- 2 เป็นแหล่งจ่ายพาหะซึ่งมีความต้านทานภายในรวมกันแล้วน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานภายในของตัวเนื้อสารกึ่งตัวนำ
- 3 เป็นแหล่งจ่ายพาหะซึ่งมีความต้านทานภายในเป็นไปตามกฎของโอห์มในตลอดช่วงของค่าความหนาแน่นกระแสที่สนใจอยู่

เมื่อนำขั้วสัมผัสที่เป็นโลหะมาเข้าคู่กับสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน(band bending) เพื่อทำให้เกิดความสมดุลย์ของระดับเฟอร์มีของทั้งสองข้างของรอยต่อ พิจารณาค่าเวิร์กฟังก์ชัน(work function: ϕ) ซึ่งนิยามว่าผลต่างระหว่างพลังงานศักย์ระดับเฟอร์มีกับระดับสุญญากาศของสารกึ่งตัวนำหรือของโลหะ และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity : χ) ซึ่งนิยามว่าผลต่างพลังงานศักย์ระหว่างขอบล่างของแถบนำกับระดับสุญญากาศ ถ้าเวิร์กฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) มากกว่าของโลหะ (ϕ_m) แล้วจะเกิดกำแพงศักย์ขึ้นตรงรอยต่อ (รูปที่ 2.9b)

โดยมีความสูงของกำแพงศักย์หลังสภาวะสมดุลคือ

$$\phi_b = \phi_m - \chi$$

กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นจะต้านการผ่านไปมาของพาหะ ในกรณีที่เวริกฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับของโลหะ (รูปที่ 2.9 a) รอยต่อเช่นนี้จะให้สมบัติโอห์มมิกได้ดีเนื่องจากพาหะสามารถผ่านไปมาได้สะดวก

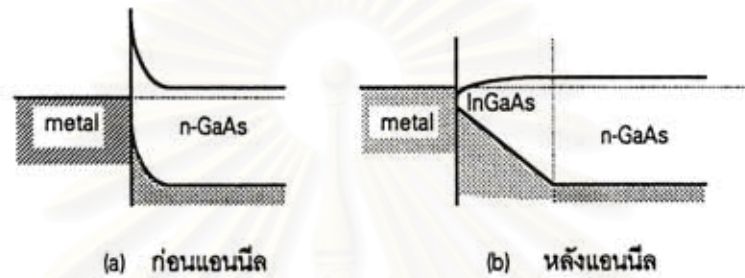


รูปที่ 2.9 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าลักษณะต่างๆ

สิ่งที่ควรทำเมื่อต้องการขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก

1. เลือกโลหะขั้วสัมผัสที่มีเวริกฟังก์ชันสอดคล้องกันกับสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะเลือกขั้วไฟฟ้าให้ได้เวริกฟังก์ชันตามต้องการ รอยต่อโอห์มมิกส่วนใหญ่จึงมักเกิดกำแพงศักย์รวมอยู่ด้วย คู่สัมผัสที่ดีควรมีกำแพงศักย์ที่ต่ำหรือบางมากพอที่พาหะจะโดดข้ามหรือทะลุผ่านไปมาได้ง่ายโดยไม่มีความแตกต่าง
2. การโด๊ปอย่างหนักบริเวณผิวที่จะต่อกับโลหะ (n^{++} สำหรับทำขั้วสัมผัสกับ n-type semiconductor, p^{++} สำหรับ p-type) ผลของการทำเช่นนี้ทำให้กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อสัมผัสจะบางมากจนพาหะสามารถทะลุผ่านไปมาได้ง่าย การโด๊ปอาจทำได้โดยการแพร่ด้วยความร้อน หรือ ผ่านกระบวนการ Ion-implantation
3. เลือกโลหะที่เหมาะสมเมื่อเกิดเป็นอัลลอยด์กับเนื้อสารแล้วมีแถบพลังงานแคบขึ้น

ช่วยลดความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อและปรับปรุงสมบัติของผิวสัมผัสให้ดีขึ้นเช่น เทคนิคการทำขั้วสัมผัสสำหรับ GaAs จะเลือกใช้โลหะ อินเดียมซึ่งทำให้ได้อัลลอยด์ของ InGaAs ซึ่งมีแถบพลังงานแคบบริเวณรอยต่อใน เทคนิคนี้ทำในระบบแอนนีสลขั้วสัมผัสซึ่งจะให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการก่อตัวของอัลลอยด์และเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเช่น ไนโตรเจนหรือ ไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของระบบแอนนีสลขั้วสัมผัสในบทที่ 4



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงบริเวณรอยต่อของ In และ GaAs หลังการแอนนีสล

4. เลือกใช้เทคนิคอื่น เช่นการชุบผิวหน้าของสารก่อนการวางโลหะขั้วไฟฟ้า หรือการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบอิลโคโทรไลต์ เป็นต้น



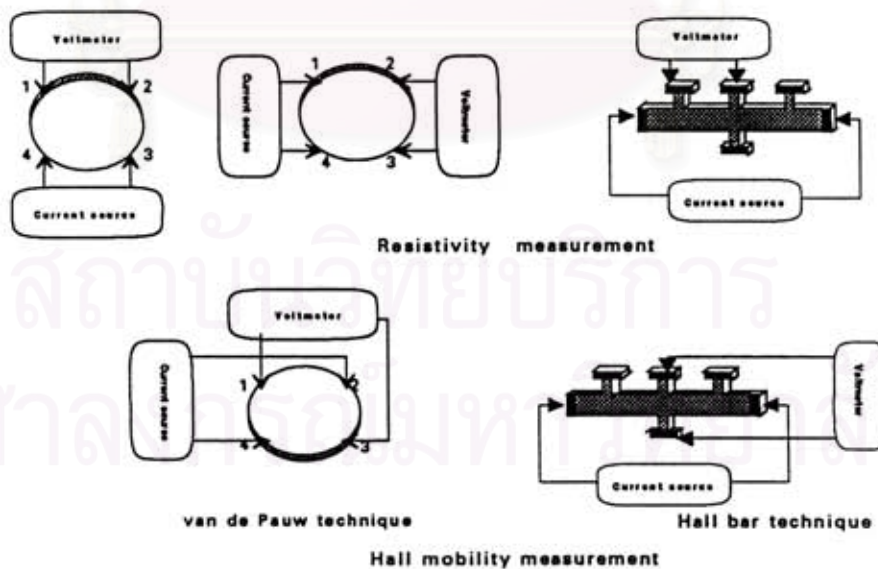
บทที่ 3

ระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดส่วนประกอบของระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ได้รับการออกแบบให้ควบคุมการทำงานได้ด้วยคอมพิวเตอร์และรวมทั้งการทำงานของโปรแกรมควบคุม

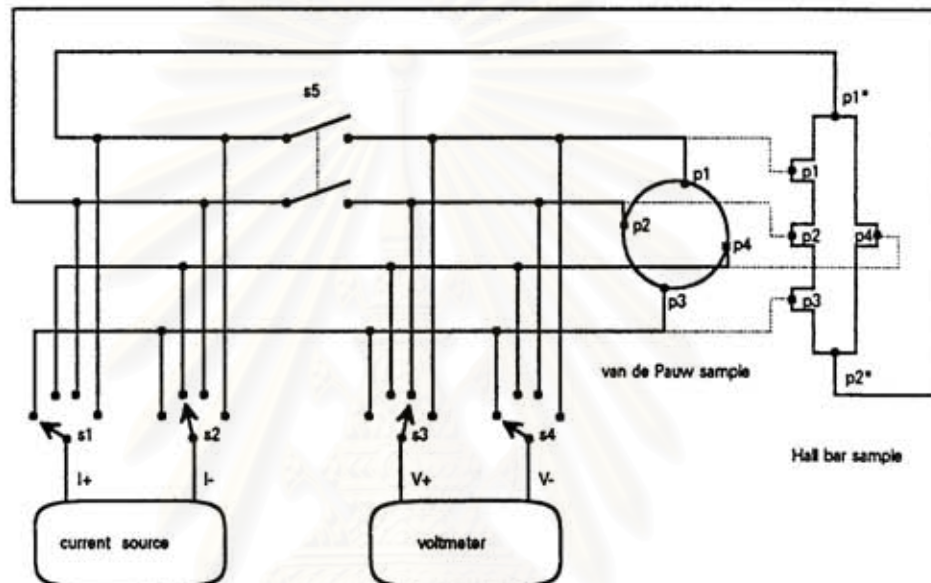
แนวคิดพื้นฐานของระบบวัด

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงเทคนิคการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสองแบบคือการวัดในแบบฮอลล์บาร์และแบบแวนเดอร์พาวซึ่งมีข้อแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงของชิ้นสารที่ทำการวัดและวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า พิจารณาระบบวัดพื้นฐานแบบฮอลล์บาร์และแบบแวนเดอร์พาวจากรูปที่ 3.1 ส่วนที่คล้ายกันจากทั้งสองวิธีคือมีการจ่ายกระแสผ่านสองขั้วไฟฟ้าและวัดความต่างศักย์จากอีกสองขั้วในขณะเดียวกัน



รูปที่ 3.1 ระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์พื้นฐาน

ดังนั้นเราจึงอาจรวมรูปแบบการวัดทั้งสองเข้าด้วยกันและปรับปรุงเพื่อให้วัดข้อมูลได้มากขึ้น จากไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมระบบวัดที่ได้รับการปรับปรุง

จากไดอะแกรม ระบบวัดใช้สวิตช์เลือกชนิด 1 ไป 4 (s1-s4) สำหรับวางขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัดลงบนบริเวณต่างๆของชิ้นสาร ซึ่งมี 4 จุดสำหรับการวัดแบบวานเดอร์พาวและอย่างน้อย 6 จุดสำหรับการวัดแบบฮอลล์บาร์ โดยการวางสวิตช์เป็นตารางเมตริกซ์ 4 x 4 ทำให้สามารถวางขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้วลงบนจุดต่างๆทั้ง 4 ของชิ้นสารได้อย่างอิสระจากกัน สำหรับการวัดแบบฮอลล์บาร์จะมีสวิตช์คู่แบบหน้าสัมผัสทางเดียว (s5) สำหรับเปลี่ยนการจ่ายกระแสในเส้นทาง p1 และ p2 ไปยัง p1* และ p2*

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 1 | p1 | p2 | p3 | p4 | I_1, V_1 | 2 | p2 | p1 | p3 | p4 | I_2, V_2 |
| 3 | p2 | p3 | p4 | p1 | I_3, V_3 | 4 | p3 | p2 | p4 | p1 | I_4, V_4 |
| 5 | p3 | p4 | p1 | p2 | I_5, V_5 | 6 | p4 | p3 | p1 | p2 | I_6, V_6 |
| 7 | p4 | p1 | p2 | p3 | I_7, V_7 | 8 | p1 | p4 | p2 | p3 | I_8, V_8 |

ก) รูปแบบของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 9 | p1 | p3 | p2 | p4 | I_9, V_9 | 10 | p3 | p1 | p2 | p4 | I_{10}, V_{10} |
| 11 | p2 | p4 | p1 | p3 | I_{11}, V_{11} | 12 | p4 | p2 | p1 | p3 | I_{12}, V_{12} |

ข) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะไม่มีสนามแม่เหล็ก

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 13 | p1 | p3 | p2 | p4 | I_{13}, V_{13} | 14 | p3 | p1 | p2 | p4 | I_{14}, V_{14} |
| 15 | p2 | p4 | p1 | p3 | I_{15}, V_{15} | 16 | p4 | p2 | p1 | p3 | I_{16}, V_{16} |

ค) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะมีสนามแม่เหล็ก -8

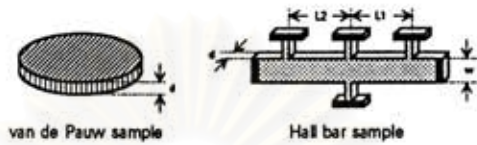
| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|---------------|---------|----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 17 | p1 | p3 | p2 | p4 | I_{17}, V_{17} | 18 | p3 | p1 | p2 | p4 | I_{18}, V_{18} |
| 19 | p2 | p4 | p1 | p3 | I_{19}, V_{19} | 20 | p4 | p2 | p1 | p3 | I_{20}, V_{20} |

ด) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะมีสนามแม่เหล็ก +8

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการวัดโดยวิธีแวนเดอร์พาว

รูปแบบของการวัดและการประมวลผล

เมื่อวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยระบบวัดจากรูปที่ 3.2 โดยใช้รูปทรงมาตรฐานตามแบบ



รูปที่ 3.3 รูปทรงของสารตัวอย่างที่ใช้ทำการวัด

วานเดอร์พาวและแบบฮอลล์บาร์ชนิด 6 ขั้ว ที่มีความหนา d และมีขนาดดังรูป 3.3 ซึ่งสามารถแยกพิจารณารูปแบบการวัดและการประมวลผลข้อมูลจากทั้งสองเทคนิคได้ดังนี้

1. การวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว (van de Pauw technique)

เมื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์โดยวิธีวานเดอร์พาว จะมีวิธีวางขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัดทั้ง 4 ขั้วและวัดข้อมูลจากชิ้นสารที่เป็นไปได้ทั้งหมด 20 แบบ ซึ่งแสดงในตาราง 3.1 สภาพต้านทานไฟฟ้าคำนวณได้จากข้อมูลจากการวัดในรูปแบบตั้งแต่ 1-8(ตาราง 3.1a) สภาพต้านทานจากทุกๆกรณีตามนิยาม 2.56 ,2.57 และสมการ 2.59 คือ

| reverse | forward |
|---|---|
| $\rho_{13} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_1 + R_3}{2} \right) / \left(\frac{R_1}{R_3} \right), R_1 = \frac{V_1}{I_1} \text{ and } R_3 = \frac{V_3}{I_3}$ | $\rho_{24} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_2 + R_4}{2} \right) / \left(\frac{R_2}{R_4} \right), R_2 = \frac{V_2}{I_2} \text{ and } R_4 = \frac{V_4}{I_4}$ |
| $\rho_{35} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_3 + R_5}{2} \right) / \left(\frac{R_3}{R_5} \right), R_3 = \frac{V_3}{I_3} \text{ and } R_5 = \frac{V_5}{I_5}$ | $\rho_{46} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_4 + R_6}{2} \right) / \left(\frac{R_4}{R_6} \right), R_4 = \frac{V_4}{I_4} \text{ and } R_6 = \frac{V_6}{I_6}$ |
| $\rho_{57} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_5 + R_7}{2} \right) / \left(\frac{R_5}{R_7} \right), R_5 = \frac{V_5}{I_5} \text{ and } R_7 = \frac{V_7}{I_7}$ | $\rho_{68} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_6 + R_8}{2} \right) / \left(\frac{R_6}{R_8} \right), R_6 = \frac{V_6}{I_6} \text{ and } R_8 = \frac{V_8}{I_8}$ |
| $\rho_{71} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_7 + R_1}{2} \right) / \left(\frac{R_7}{R_1} \right), R_7 = \frac{V_7}{I_7} \text{ and } R_1 = \frac{V_1}{I_1}$ | $\rho_{82} = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_8 + R_2}{2} \right) / \left(\frac{R_8}{R_2} \right), R_8 = \frac{V_8}{I_8} \text{ and } R_2 = \frac{V_2}{I_2}$ |
| $\rho_{mean} = \frac{[\rho_{13} + \rho_{24} + \rho_{35} + \rho_{46} + \rho_{57} + \rho_{68} + \rho_{71} + \rho_{82}]}{8}$ | |

ตารางที่ 3.2 สมการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการวัดโดยวิธีวานเดอร์พาว

สำหรับรูปแบบ 9-20 จากตารางที่ 3.1b - 3.1d คือข้อมูลการวัดสำหรับการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ จากนิยาม 2.62 และสมการ 2.63 สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ที่ได้จากการวัดทุกรูปแบบคือ

| forward | reverse |
|--|--|
| $\mu_{9,13} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_9 - R_{13}}{B} \right], R_9 = \frac{V_9}{I_9} \text{ and } R_{13} = \frac{V_{13}}{I_{13}}$ | $\mu_{10,14} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{10} - R_{14}}{B} \right], R_{10} = \frac{V_{10}}{I_{10}} \text{ and } R_{14} = \frac{V_{14}}{I_{14}}$ |
| $\mu_{11,15} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{11} - R_{15}}{B} \right], R_{11} = \frac{V_{11}}{I_{11}} \text{ and } R_{15} = \frac{V_{15}}{I_{15}}$ | $\mu_{12,16} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{12} - R_{16}}{B} \right], R_{12} = \frac{V_{12}}{I_{12}} \text{ and } R_{16} = \frac{V_{16}}{I_{16}}$ |
| $\mu_{17,9} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{17} - R_9}{B} \right], R_{17} = \frac{V_{17}}{I_{17}} \text{ and } R_9 = \frac{V_9}{I_9}$ | $\mu_{18,10} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{18} - R_{10}}{B} \right], R_{18} = \frac{V_{18}}{I_{18}} \text{ and } R_{10} = \frac{V_{10}}{I_{10}}$ |
| $\mu_{19,11} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{19} - R_{11}}{B} \right], R_{19} = \frac{V_{19}}{I_{19}} \text{ and } R_{11} = \frac{V_{11}}{I_{11}}$ | $\mu_{20,12} = \frac{d}{\rho_{mean}} \left[\frac{R_{20} - R_{12}}{B} \right], R_{20} = \frac{V_{20}}{I_{20}} \text{ and } R_{12} = \frac{V_{12}}{I_{12}}$ |
| $\mu_{mean} = \frac{[\mu_{9,13} + \mu_{10,14} + \mu_{11,15} + \mu_{12,16} + \mu_{17,9} + \mu_{18,10} + \mu_{19,11} + \mu_{20,12}]}{8}$ | |

ตารางที่ 3.3 สมการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากการวัดโดยวิธีฮอลล์บาร์

2. การวัดด้วยวิธีฮอลล์บาร์ (Hall bar technique)

สำหรับการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคฮอลล์บาร์ จะได้รูปแบบการวัดทั้งหมด 12 รูปแบบดังตารางที่ 3.4 จากตาราง 3.4a และสมการ 2.38 เราสามารถคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ต่างกันทั้งหมด 6 ค่า ดังนี้

| forward | reverse |
|---|--|
| $\rho_1 = R_1 \frac{wd}{L_1}; R_1 = \frac{V_1}{I_1}$ | $\rho_2 = R_2 \frac{wd}{L_1}; R_2 = \frac{V_2}{I_2}$ |
| $\rho_3 = R_3 \frac{wd}{L_2}; R_3 = \frac{V_3}{I_3}$ | $\rho_4 = R_4 \frac{wd}{L_2}; R_4 = \frac{V_4}{I_4}$ |
| $\rho_5 = R_5 \frac{wd}{L_1+L_2}; R_5 = \frac{V_5}{I_5}$ | $\rho_6 = R_6 \frac{wd}{L_1+L_2}; R_6 = \frac{V_6}{I_6}$ |
| $\rho_{mean} = \frac{[\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_6]}{6}$ | |

ตารางที่ 3.5 สมการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าจากการวัดโดยวิธีฮอลล์บาร์

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 1 | p1* | p2* | p1 | p2 | I_1, V_1 | 2 | p2* | p1* | p1 | p2 | I_2, V_2 |
| 3 | p1* | p2* | p2 | p3 | I_3, V_3 | 4 | p2* | p1* | p2 | p3 | I_4, V_4 |
| 5 | p1* | p2* | p1 | p3 | I_5, V_5 | 6 | p2* | p1* | p1 | p3 | I_6, V_6 |

a) รูปแบบทั้งหมดของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 7 | p1* | p2* | p2 | p4 | I_7, V_7 | 8 | p2* | p1* | p2 | p4 | I_8, V_8 |

(b) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะไม่มีสนามแม่เหล็ก

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 9 | p1* | p2* | p2 | p4 | I_9, V_9 | 10 | p2* | p1* | p2 | p4 | I_{10}, V_{10} |

(c) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะมีสนามแม่เหล็ก -B

| configuration | forward | | | | measurement parameter | configuration | reverse | | | | measurement parameter |
|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|---------------|---------|-----|----|----|-----------------------|
| | I+ | I- | V+ | V- | | | I+ | I- | V+ | V- | |
| 11 | p1* | p2* | p2 | p4 | I_{11}, V_{11} | 12 | p2* | p1* | p2 | p4 | I_{12}, V_{12} |

(d) รูปแบบของการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ระยะมีสนามแม่เหล็ก +B

ตารางที่ 3.4 รูปแบบการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีฮอลล์บาร์

และจากตารางผลการวัด 3.4b-3.4d สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์คำนวณได้จากชุดสมการดังนี้

| forward | reverse |
|---|---|
| $\mu_1 = \left \frac{V_7}{I_7} - \frac{V_9}{I_9} \right \cdot \frac{d}{B\rho_{mean}}$ | $\mu_2 = \left \frac{V_8}{I_8} - \frac{V_{10}}{I_{10}} \right \cdot \frac{d}{B\rho_{mean}}$ |
| $\mu_3 = \left \frac{V_9}{I_9} - \frac{V_{11}}{I_{11}} \right \cdot \frac{d}{B\rho_{mean}}$ | $\mu_4 = \left \frac{V_{12}}{I_{12}} - \frac{V_{10}}{I_{10}} \right \cdot \frac{d}{B\rho_{mean}}$ |
| $\mu_{mean} = \frac{[\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4]}{4}$ | |

ตารางที่ 3.6 สมการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากการวัดโดยวิธีฮอลล์บาร์

ผลการวัดจากทั้งสองวิธีเราสามารถคำนวณความเข้มของพาหะข้างมากได้จาก

$$n = \frac{r}{e\rho_{mean}\mu_{mean}} \cong \frac{1}{e\rho_{mean}\mu_{mean}} \quad (3.1)$$

การออกแบบและสร้างระบบเครื่องมือวัด

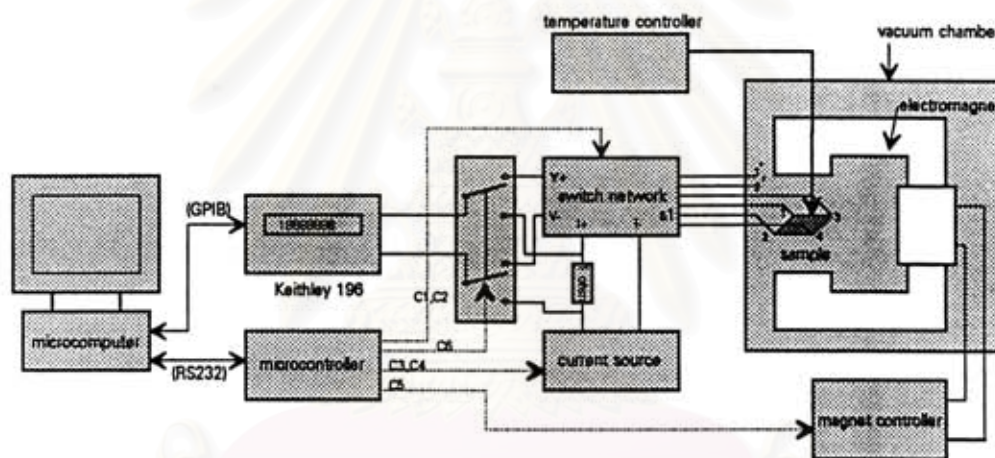
ระบบวัดจากรูปที่ 3.2 มีข้อดีคือจำนวนรูปแบบของการวัดข้อมูลมาก ซึ่งทำให้ทราบรายละเอียดของเนื้อสารได้มาก อย่างไรก็ตามเป็นการยุ่งยากที่จะวัดให้ได้ข้อมูลทั้งหมดและไม่เหมาะกับการวัดกับสารตัวอย่างจำนวนมากๆ ในปัจจุบันไมโครคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในด้านการวัดเป็นอันมาก มีการพัฒนาอุปกรณ์ช่วยการวัดเช่น มัลติมิเตอร์ ให้สามารถเชื่อมโยงและควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ได้ หรือมีผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ที่เปิดกว้างให้ผู้ใช้สามารถออกแบบโปรแกรมการควบคุมได้ด้วยตนเอง ดังนั้นหากดัดแปลงระบบการวัดให้เชื่อมโยงและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้การวัดสะดวกและมีความเที่ยงตรงมากขึ้น

แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงประยุกต์ดัดแปลงระบบวัดซึ่งอาศัยหลักการในรูปที่ 3.2 ให้เชื่อมโยงเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ตระกูลไอบีเอ็มพีซี (IBM PC) โดยมีการสร้างวงจรควบคุมระบบและวงจรเชื่อมโยง (interface) ในบางส่วนขึ้นเองให้ใช้งานร่วมกับดิิจิตอลมัลติมิเตอร์ Keithley model 196 ซึ่งใช้ระบบเชื่อมโยงด้วยมาตรฐาน GPIB (General Purpose Interface Bus) ร่วมกับไมโครคอมพิวเตอร์ รวมถึงพัฒนาโปรแกรมควบคุมการวัด, การเก็บข้อมูลและการประมวลผลข้อมูล โดยมุ่งเน้นความง่าย, ความคล่องตัวในการใช้งานและความยืดหยุ่นในการพัฒนาระบบในภายหลัง

ขีดความสามารถของระบบวัดที่ต้องการหลังการปรับปรุงคือ

- 1 ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ที่มีขีดความสามารถสูง ซึ่งทำการวัดและเก็บข้อมูลได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบให้ผู้ใช้วัดเองได้
- 2 สามารถรองรับการวัดสารตัวอย่างที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงๆได้ดี
- 3 ให้ความสะดวกในการประมวลผลข้อมูล และมีความถูกต้องสูง
- 4 สามารถทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำมากได้ดี

ในรูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของระบบวัดที่ได้รับการพัฒนาให้เชื่อมโยงเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์และมีขีดความสามารถดังกล่าวซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ



รูปที่ 3.4 โดอะแกรมระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ IBM pc

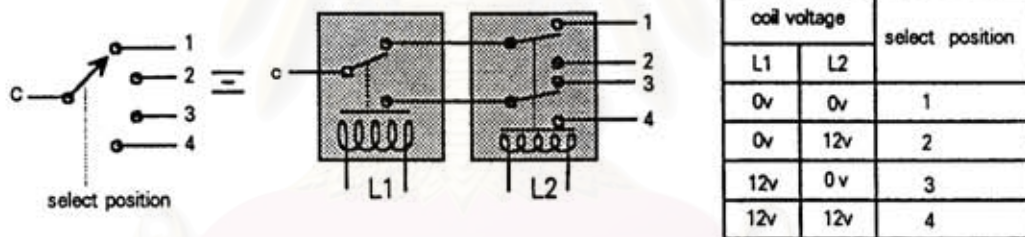
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นเครื่องควบคุมและประมวลผลหลัก ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานคือบอร์ดประมวลผลหลัก (main board) ที่มีไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล 8086 มีหน่วยความจำหลักอย่างน้อย 640 กิโลไบต์ และชิพสนับสนุนอื่นๆ ,จอภาพสีชนิดVGA,คีย์บอร์ด,ช่องซิปดิสก์ไดรฟ์หรือ ฮาร์ดดิสก์,และการ์ดเชื่อมโยงแบบ multi I/O ที่ปักอยู่บนช่องขยายระบบ(slot)ของบอร์ดประมวลผลหลัก

การติดต่อเชื่อมโยงกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทำได้ 2 แบบคือ การเชื่อมโยงผ่านระบบเชื่อมโยงมาตรฐานของเครื่องและการเชื่อมโยงผ่านช่องขยายระบบ(slot) ระบบเชื่อมโยง

มาตรฐานติดตั้งอยู่บนการ์ดเชื่อมโยงแบบ multi I/O ซึ่งมีอยู่บนเครื่องทุกรุ่นสำหรับเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ภายนอกอื่นๆ ซึ่งจะมีพอร์ท(port) มาตรฐานให้เลือกใช้ได้เช่น พอร์ทขนาน 8 บิตทาง ช่องเสียบพริ้นเตอร์ ,พอร์ทอนุกรม(RS232)ทางช่องเสียบเมาท์และไมเค็มและ อนุาลอกอินเตอร์ เฟสทางช่องเกมส์พอร์ท เป็นต้น สำหรับการเชื่อมโยงผ่านช่องขยายระบบ (slot) จำเป็นต้อง กระทำผ่านการดเชื่อมโยงที่สร้างขึ้นเฉพาะงานที่ผู้ใช้ต้องการเช่น งานที่ต้องการความเร็วในการ ถ่ายข้อมูลสูงมาก จากไดอะแกรม 3.4 เราเลือกใช้การเชื่อมโยงทั้ง 2 แบบคือ เชื่อมโยงทาง พอร์ทอนุกรม RS232 และ เชื่อมโยงทางช่องขยายระบบคือ GPIB หรือ IEEE488

2. วงจรสวิตช์ควบคุมการวัด(switch network)

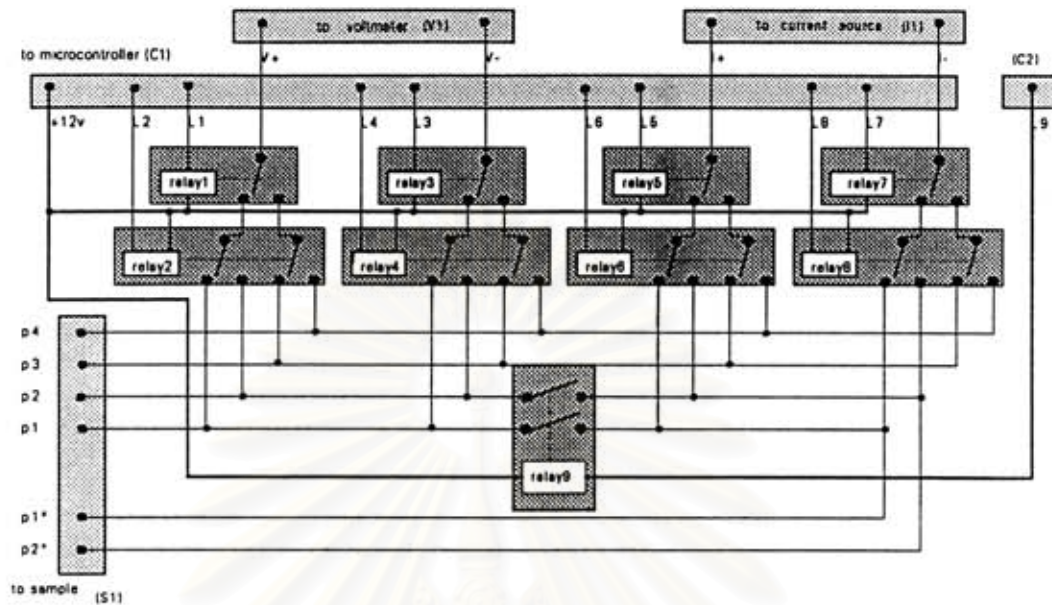
วงจรสวิตช์ควบคุมการวัดประกอบขึ้นจากรีเลย์ 1 คู่หน้าสัมผัสและรีเลย์ 2 คู่หน้าสัมผัส เป็นชุดสวิตช์เลือกแบบไบนารี(binary selector) ที่มีตารางตรรกดังรูป3.5



รูปที่ 3.5 สวิตช์เลือกแบบไบนารีและตารางตรรก

เมื่อแทนชุดรีเลย์เหล่านี้ลงในสวิตช์เลือกของวงจรรูปที่ 3.2 (s1-s5) จะได้วงจรสวิตช์ที่สามารถ ควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณไฟฟ้าดังรูปที่ 3.6

โดยมี C1 และ C2 คือกลุ่มสายสัญญาณควบคุมที่จะไปเข้าภาคขับกำลังของวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) , V1 และ I1 คือกลุ่มสัญญาณไปยังหัวของโวลท์มิเตอร์ และหัวของแหล่งจ่ายกระแสและ S1 คือกลุ่มสายสัญญาณไปยังจุดต่างๆบนชิ้นสาร ข้อดีของ การเลือกใช้รีเลย์เป็นวงจรสวิตช์คือ รีเลย์มีความต้านทานหน้าสัมผัสต่ำมากเมื่อเทียบกับสวิตช์ ที่เป็นสารกึ่งตัวนำอื่นๆและสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง ข้อเสียของรีเลย์คือต้องใช้พลังงาน มากในการควบคุมการทำงาน



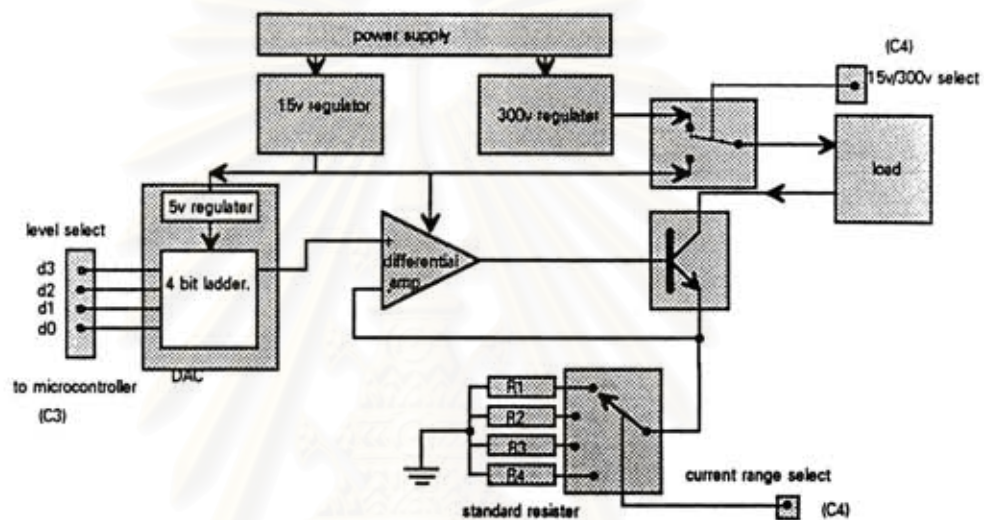
รูปที่ 3.6 วงจรสวิตช์ควบคุมการวัด

3. แหล่งจ่ายกระแส (current source)

การจ่ายกระแสในขณะทำการวัดทำได้หลายแบบเช่นกระแสคงที่, แรงดันไฟฟ้าคงที่หรือไม่คงที่ทั้งสองอย่าง สำหรับการวัดด้วยแรงดันคงที่เหมาะสำหรับการวัดกับสารที่มีรูปทรงสมมาตรเช่น สีเหลียมจัดรัสเพราะการวัดของแต่ละรูปแบบมีกระแสไหลใกล้เคียงกัน แต่สำหรับสารที่มีรูปร่างทั่วไปแต่ละตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าคู่ใดๆย่อมแตกต่างกันและไม่แน่นอน ส่งผลให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านชิ้นสารมีระดับต่าง ๆ กัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงเพราะการวัดแต่ละครั้งทำให้เกิดความร้อนบนชิ้นสารไม่เท่ากัน การเลือกใช้แหล่งกำเนิดกระแสคงที่ทำให้การวัดในแต่ละรูปแบบอยู่ในสภาพที่คล้ายกันสามารถเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งให้ข้อมูลที่มีความถูกต้องมากกว่า วงจรจ่ายกระแสคงที่ที่ต้องการในระบบเช่นนี้มีสมบัติสำคัญคือ สามารถจ่ายกระแสได้ในช่วงกว้างและให้แรงดันเอาต์พุตได้สูง ทำให้การวัดครอบคลุมตั้งแต่สารที่มีสภาพต้านทานต่ำหรือสูงได้ดีและจะต้องให้กระแสที่มีความคงที่มาก

วงจรจ่ายกระแสคงที่ที่ใช้กลไกการควบคุมความคงที่ของกระแสโดยออปแอมป์จัดวงจรกับทรานซิสเตอร์เป็นวงจร current sink ที่สามารถควบคุมระดับกระแสที่จ่ายออกไปด้วยกลุ่มของสัญญาณดิจิทัลขนาด 4 บิต ดังแสดงเป็นไดอะแกรมรูปที่ 3.7 และวงจรสมบูรณ์อยู่ในภาคผนวก ก. กระแสที่ผ่านโหลด(load)จะไหลครบวงจรเมื่อผ่านทรานซิสเตอร์และตัวต้านทาน

มาตรฐาน(standard resister) ที่สามารถเลือกได้ 4 ค่า ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(Voltage referrence) ด้วยวงจรรขยายความแตกต่าง(differental amplifier) หรือออปแอมป์ ความแตกต่างของสัญญาณทั้งสองถูกขยายและส่งไปควบคุมทรานซิสเตอร์ ให้ปรับกระแสที่ไหลผ่านให้ได้ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทานมาตรฐานและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงน้อยที่สุด



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมวงจรจ่ายกระแสคงที่

แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผลิตมาจากภาค DAC(digital to analog converter) ที่ประกอบด้วย วงจรรักษาแรงดันไฟฟ้าคงที่ 5v และวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้าแบบแลดเดอร์ (ladder) โดยออปแอมป์ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดและตัวต้านทานเป็นวงจรรักษาแรงดันคงที่ 5 v ที่มีความเที่ยงตรงสูง แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะส่งไปยังวงจลดทอนแบบแลดเดอร์ (ladder) ที่ประกอบด้วยวงจรตัวต้านทาน และไอซี 4066 ที่มีอนาลอกสวิตช์ 4 ชุด (quad analog switch) อยู่ภายใน การกำหนดระดับกระแสควบคุมทำได้โดย

1) เลือกค่าระดับของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งควบคุมด้วยสัญญาณดิจิตอลขนาด 4 บิต (d0-d3) ที่จะควบคุมการปิด-เปิดของอนาลอกสวิตช์ทั้ง 4 ตัว ให้ปิด-เปิดแรงดันไฟฟ้า 5v ให้ผ่านวงจลดทอนในระดับต่างๆ สามารถปรับระดับแรงดันอ้างอิงได้ตั้งแต่ 0-5 V จำนวน 16 ขั้นๆ ละเท่าๆกัน(0-15) มีผลให้ระดับกระแสควบคุมเพิ่ม-ลดด้วยระดับขั้นที่คงที่

2) เลือกค่าตัวต้านทานมาตรฐานซึ่งมีได้ 4 ค่า ซึ่งควบคุมการเลือกด้วยวงจรรีเลย์ที่จัด

วงจรเป็นสวิตช์เลือกแบบไบนารี (binary selector) โดยตัวต้านทานมาตรฐานแต่ละค่าที่ติดกัน จะมีค่าเป็น 10 เท่าของกันและกันคือ 100Ω , $1k\Omega$, $10k\Omega$ และ $100k\Omega$ ตามลำดับจะให้ค่า กระแสควบคุมเพิ่มหรือลดห่างกันขึ้นละ 10 เท่า

จากการกำหนดระดับกระแสควบคุมทั้งสองแบบเราจะได้ระดับกระแสควบคุมที่มีขนาด

$$I = \frac{\frac{5}{16}m}{R} \quad (3.2)$$

m คือระดับขั้นของแรงดันอ้างอิงมีค่าตั้งแต่ 0 -15 (0v - 5v)

R คือค่าความต้านทานมาตรฐาน

เมื่อจ่ายกระแสให้กับชิ้นสาร แรงดันไฟฟ้าคร่อมโหนดจะต้องมีค่าไม่มากไปกว่าแรงดัน ที่วงจรสามารถจ่ายได้ ในวงจรจึงมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 300v อยู่ด้วยเพื่อให้วงจรสามารถ ควบคุมการจ่ายกระแสในกรณีที่โหนดมีความต้านทานสูงได้ และใช้ควบคุมกับแหล่งจ่ายไฟแรงดัน ต่ำ 15v กรณีที่โหนดมีความต้านทานต่ำและต้องการกระแสสูง ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทั้งสองสามารถเลือกได้ด้วยรีเลย์

4. มัลติมิเตอร์ (multimeter)

ระบบวัดได้รับการออกแบบให้ทำการวัดทั้งความต่างศักย์และกระแสด้วยโวลท์มิเตอร์ เครื่องเดียว การวัดกระแสทำโดยการวัดความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทานมาตรฐาน 1 โอห์มที่มี กระแสที่ต้องการวัดกระแสไหลผ่าน และอาศัยการสวิตช์เลือกวัด (รูปที่ 3.4) เราใช้ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ Keithley model 196 สำหรับการวัดความต่างศักย์ดังกล่าว

Keithley 196 ให้การแสดงผลเป็นตัวเลข 7 หลักครั้ง สามารถวัดความต่างศักย์ได้ตั้งแต่ ± 0.0000001 ถึง ± 300.00000 V การวัดทำได้ทั้งในแบบผู้ใช้เลือกย่านเองและแบบอัตโนมัติ (Autorange) อัตราการสุ่มสัญญาณวัดมีค่าได้ตั้งแต่ 1 ms - 3s การควบคุมทำงานของมัลติมิเตอร์ นอกจากการสั่งจากสวิตช์หน้าเครื่องแล้ว ยังควบคุมได้ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์โดยกระทำการ เชื่อมโยง GPIB การควบคุมผ่านไมโครคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลการวัดที่เร็วมากถึง 100 ข้อมูลต่อวินาที อย่างไรก็ตามหากพิจารณาข้อมูลจำเพาะของ Keithley 196 (ในภาคผนวก ข) จะพบว่าการใช้ Keithley 196 สำหรับวัดความต่างศักย์ขนาดสูงกว่า 30 โวลท์บนสารที่มีความต้านทานสูงๆ ($R > 1M\Omega$) จะมีความคลาดเคลื่อนของการวัดอันเนื่องจากความต้านทานภายในของ

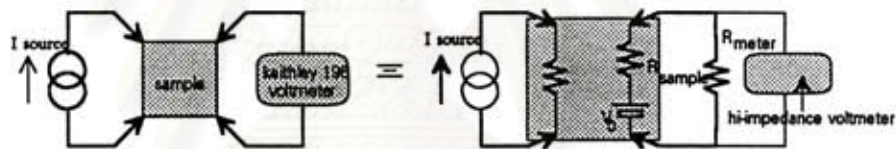
Keithley 196 มิไม่สูงพอ ซึ่งปัญหานี้แก้ไขได้จากหัวข้อต่อไปนี้

เทคนิคการลดความคลาดเคลื่อนของการวัดความต่างศักย์

มิเตอร์ในอุดมคติจะมีความต้านทานไฟฟ้าภายในที่สูงมากเมื่อทำการวัดระบบใดๆ จะไม่รบกวนผลการวัด เนื่องจากภาคนำของ Keithley 196 ประกอบด้วยวงจรลดทอนความต่างศักย์เพื่อให้สามารถวัดความต่างศักย์ในหลายๆระดับได้ วงจรส่วนนี้มักเป็นตัวกำหนดความต้านทานภายในของโวลท์มิเตอร์ พิจารณาการวัดด้วยเทคนิคของวานเดอร์พาวจากทฤษฎีการเทียบวงจรแบบ thevenin network สามารถแทนวงจรการวัดด้วยวงจรสมมูลย์ของ ความต้านทานและแหล่งจ่ายแรงดัน ดังรูป 3.8

จะเห็นได้ว่าแรงดันจาก V_0 ถูกแบ่งด้วย R_{meter} และ R_{sample} แรงดันปรากฏที่โวลท์มิเตอร์จึงเท่ากับ

$$\text{แรงดันไฟฟ้าปรากฏ} = V_0 \times \left[\frac{R_{meter}}{R_{meter} + R_{sample}} \right] \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.8 วงจรเปรียบเทียบของการวัดแบบวานเดอร์พาว

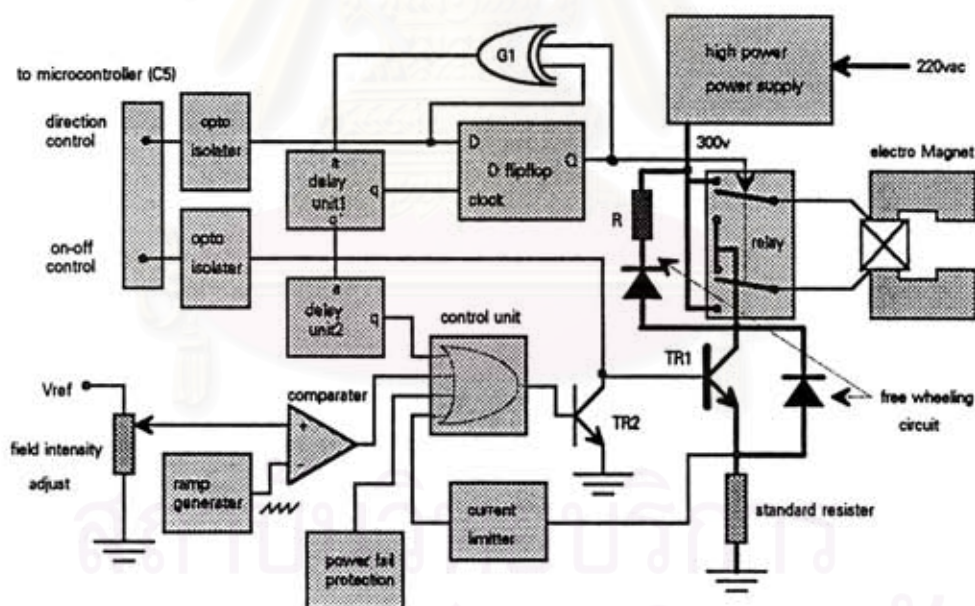
สำหรับโวลท์มิเตอร์ในอุดมคติมีความต้านทานภายในสูงกว่าเนื้อสารมากๆ จากสมการ 3.3 ค่าบั่นทอนเทอมหลังมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่าที่อ่านได้จึงมีค่าเท่ากับ V_0 จากตารางข้อมูลจำเพาะของ Keithley 196 จะพบว่าในช่วงวัดแรงดัน 30v และ 300v มีความต้านทานภายใน 10 M Ω และ 11.01 M Ω ซึ่งเป็นค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับชิ้นสารที่มีความต้านทานสูงๆ ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่อ่านได้จะมากกว่า 5 % ถ้า R_{sample}/R_{meter} มากกว่า 3

ดังนั้นหากต้องการวัดให้ได้ค่าความต่างศักย์ที่ถูกต้องจึงต้องทราบค่า R_{sample}/R_{meter} โดยการวัดความต้านทานภายในของสิ่งที่ต้องการวัดไว้ก่อน ซึ่ง Keithley 196 จะวัดความต่างศักย์และความต้านทานด้วยช่องวัดช่องเดียวกันอยู่แล้ว นอกจากนี้การวัดความต้านทานต้องวัดในสถานะเดียวกันกับที่วัดความต่างศักย์โดยไม่มีแหล่งจ่ายกระแสเข้ามาเกี่ยวข้อง มีข้อยกเว้นสำหรับสารที่มีความต้านทานไม่คงที่และเปลี่ยนแปลงตามกระแสหรือมีขั้วสัมผัสไม่เป็นโอห์มมิกเทคนิคการปรับแก้นี้จะใช้ไม่ได้

4. ระบบแม่เหล็กและวงจรควบคุม

เป็นระบบแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสามารถควบคุมระดับความแรงได้และไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาด ซึ่งประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดความแรงสูงสุด 7000 เกาส์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง 300 v ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 5 แอมป์และระบบควบคุมการ ปิด-เปิด, เปลี่ยนขั้ว และการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับแม่เหล็ก ระบบควบคุมจะมีความจำเป็นมากสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และใช้พลังงานไฟฟ้าสูงๆ

วงจรควบคุมแม่เหล็ก ทำหน้าที่ปิดเปิด, เปลี่ยนขั้วแม่เหล็กและป้องกันแรงดันย้อนกลับที่ผลิตจากแม่เหล็กในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะขั้วแม่เหล็กกระทันหันซึ่งมีกำลังสูงมากอาจทำให้เกิดความเสียหายกับระบบได้ วงจรประกอบด้วยภาคแปลงไฟ 220 v เป็นไฟตรง 300 v ,วงจรป้องกันการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กกระทันหันและป้องกันกระแสเกิน,วงจรปรับระดับความแรงแม่เหล็กดังแสดงในไดอะแกรมในรูปที่ 3.9 และวงจรสมบูรณ้อยู่ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมวงจรควบคุมแม่เหล็ก

การทำงานของวงจรเมื่อมีสัญญาณเปิดแม่เหล็ก(on-off control) สัญญาณนี้จะทำให้ทรานซิสเตอร์ TR1 เปิดให้กระแสที่ผ่านขดลวดแม่เหล็กไหลครบวงจร เมื่อมีสัญญาณเปลี่ยนขั้วแม่เหล็ก (direction control) สัญญาณนี้จะไปกระตุ้นวงจรหน่วงเวลาตัวแรก (delay unit1) ให้เริ่ม

ทำงานพร้อมกับบังคับให้วงจรหน่วงเวลาตัวที่สอง(delay unit2) ส่งสัญญาณผ่านหน่วยควบคุม (control unit) กระตุ้นทรานซิสเตอร์TR2 ให้เริ่มทำงานและหยุดการทำงานของ TR1ทำให้แม่เหล็กปิด วงจรหน่วงเวลาตัวแรกจะหน่วงเวลาเพื่อรอให้สนามแม่เหล็กยุบตัวลงและคายพลังงานผ่านวงจรไดโอดและตัวต้านทาน(free wheeling circuit) จนหมดและวงจรหน่วงเวลาที่1 จะกระตุ้น ฟลิปฟลอป(d-flipflop)และรีเลย์กลับขั้วให้ทำงาน พร้อมกับกระตุ้นตัวหน่วงเวลาที่สองให้เริ่มหน่วงเวลาและหน่วงเวลาจนรีเลย์เปลี่ยนขั้วเรียบร้อยแล้วจึงเปิดแม่เหล็กให้ทำงาน เทคนิคเช่นนี้จะสามารถป้องกันแรงดันย้อนกลับได้ดี

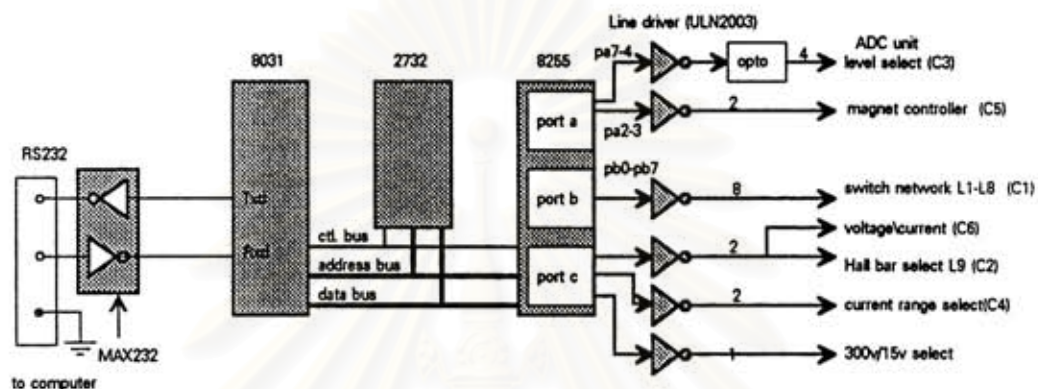
การควบคุมความแรงของสนามแม่เหล็กอาศัยเทคนิคการสวิทซ์ปิด-เปิดแม่เหล็กด้วยสัญญาณความถี่ที่ได้จากการผสมของสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและสัญญาณไฟฟ้าแบบ ฟันเลื่อย(Ramp) โดยวงจรเปรียบเทียบ (comparator) และเรียกเทคนิคการผสมนี้ว่า Pulse width modulation (PWM) สัญญาณที่ได้จะมี-duty cycle (duty cycle) แปรผันตรงกับระดับสัญญาณกระแสตรงที่ป้อนเข้าไป ซึ่งปรับได้จากโพเทนชิโอมิเตอร์ (field intensity adjust) สัญญาณ PWM จะป้อนผ่านหน่วยควบคุม(control unit) และควบคุมการปิด-เปิดของ TR1 อัตราส่วนของเวลาปิด-เปิดสวิทซ์จะเป็นตัวกำหนดพลังงานที่จ่ายให้แม่เหล็ก

นอกจากนี้ยังมีระบบป้องกันกระแสที่ไหลผ่านแม่เหล็กเกินระดับอันตราย(current limiter) และระบบป้องกันการกลับขั้วเนื่องจากไฟฟ้าดับกระทันหัน(power-fail protection) โดยระบบทั้งสองจะกระตุ้นหน่วยควบคุม (control unit)ให้ปิดแม่เหล็กในทันทีก่อนที่รีเลย์กลับขั้วจะเปลี่ยนสถานะหน้าสัมผัส ระบบควบคุมนี้ได้รับการออกแบบให้เชื่อมต่อโดยตรงกับอยู่กับไฟบ้าน 220v จึงมีอันตรายหากสัมผัสกับวงจรโดยตรง สายสัญญาณควบคุม(on-off control) และ (direction control) จึงต้องกันด้วยวงจรออปโตไอโซเลเตอร์ (opto-isolator)

5. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ช่วยควบคุมการวัดและเชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์

มีหน้าที่ควบคุมระบบในข้างต้น(ส่วนที่ 2 ถึง 4) เช่นควบคุมการจัดตัวของระบบสวิทซ์, ควบคุมระบบแม่เหล็กและควบคุมระดับของกระแสที่ผ่านชิ้นสาร โดยทำงานตามคำสั่งที่ส่งมาจากไมโครคอมพิวเตอร์ หรือในบางครั้งอาจรับคำสั่งโดยตรงจากผู้ใช้ผ่านทางแป้นคีย์หน้าเครื่อง ในกรณีของการรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ การสื่อสารคำสั่งใช้รูปแบบมาตรฐาน RS232 โดยมีสายรับส่งสัญญาณ 3 เส้นเชื่อมโยงเข้าที่ช่องเสียบพอร์ตสื่อสารของไมโครคอมพิวเตอร์ จากไดอะแกรมรูปที่ 3.10 และวงจรสมบูรณ์ในภาคผนวก ก. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย

ไมโครโปรเซสเซอร์ตระกูล mcs51 เบอร์ 8031, หน่วยความจำอีพรอม 2716 ,พอร์ท 8255 และวงจรเชื่อมต่อกับวงจรภายนอก ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำงานตามซอฟต์แวร์ที่อยู่ภายในอีพรอมคอยรับคำสั่งปฏิบัติงานจากสายสื่อสาร

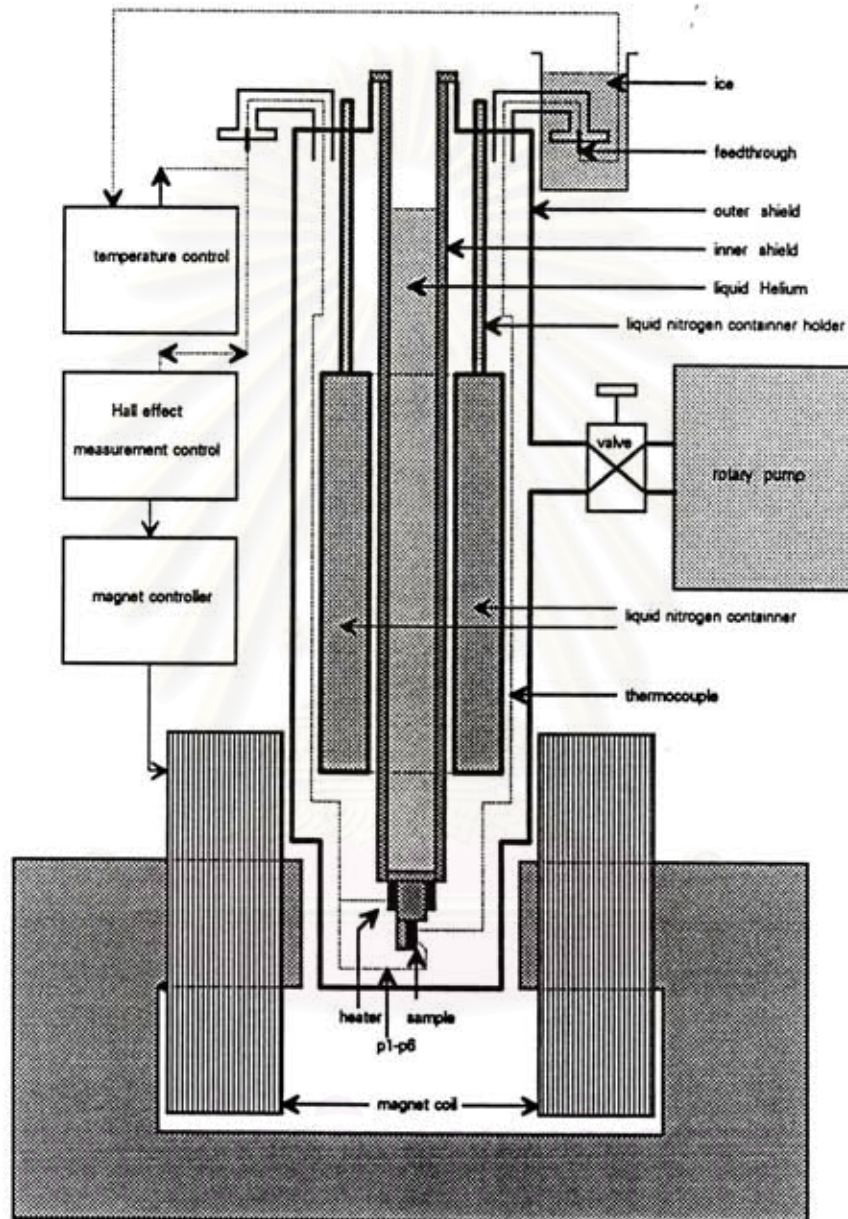


รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

การควบคุมวงจรภายนอกกระทำผ่านไอซีขับกำลัง (line driver) เบอร์ ULN2003 ภายในไอซีมีวงจรขับกำลังและวงจรไดโอดป้องกันแรงดันย้อนกลับ (free wheeling circuit) จำนวน 7 ชุด มีอินพุตรับสัญญาณมาตรฐานที่ทีแอลได้ และมีเอาต์พุตแบบทรานซิสเตอร์คอลเลคเตอร์เปิด (open collector) รับกระแสได้ถึง 500 mA จึงสามารถขับรีเลย์หรือออปโตไดโอดได้โดยตรง วงจรขับภายนอกแบ่งได้เป็น 2 พวก คือ

- 1) พวกที่ขับได้โดยตรงด้วยวงจรขับคือรีเลย์จากวงจรสวิทช์ (C1, C2) และจากวงจรกระแสคงที่ (C4)
- 2) พวกที่ต้องกันด้วยออปโตไอโซเลเตอร์ (optoisolater) เช่นภาค DAC จากวงจรกระแสคงที่ (C3) และภาคควบคุมแม่เหล็ก (C5) เนื่องจากวงจรพวกนี้ถูกออกแบบให้ใช้ไฟเลี้ยงและกราวด์คนละชุดกับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรขับกำลังของสายสื่อสารข้อมูล RS232 เลือกใช้เบอร์ max232 ซึ่งใช้ไฟเลี้ยง +5v สามารถส่งสัญญาณ RS232 ได้ที่ระดับแรงดัน $\pm 9v$ เนื่องจากมีวงจรที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ภายใน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.11 ห้องวัดอุณหภูมิต่ำ

6. ระบบห้องวัดอุณหภูมิต่ำ (Vacuum chamber)

เป็นส่วนที่จะบรรจุและทำการวัดสารที่ทำให้การวัดทำได้ที่อุณหภูมิต่ำมากโดยใช้ฮีเลียมเหลวหรือไนโตรเจนเหลวช่วยทำความเย็น จากรูปที่ 3.11 ห้องวัดประกอบด้วยท่อทรงกระบอกขนาดใหญ่และเล็กวางซ้อนกัน ท่อชั้นนอก (outer shield) ทำจากทองเหลืองเชื่อมต่อกับฐานยึดระบบและเชื่อมต่อกับข้อต่อระบบปั๊มแบบโรตารี (rotary pump) โดยมีปลายด้านล่างสามารถเปิด-ปิดได้ ท่อชั้นใน (inner shield) ทำจากโลหะผสมที่เป็นฉนวนความร้อนด้านปลายท่อ ด้านหนึ่งปิด อีกด้านหนึ่งมีบายพาสกันรั่ว(O-ring) และวางบนปากท่อชั้นนอก ใจกลางของท่อชั้นในเป็นระบบเปิดเป็นที่กักเก็บฮีเลียมเหลว(หรือ ไนโตรเจนเหลว) ช่องว่างระหว่างท่อทั้งสองเป็นระบบปิดและมีทางออกต่อไปยังโรตารีปั๊ม ซึ่งจะทำให้ภายในเป็นสุญญากาศเพื่อลดการพาความร้อนระหว่างท่อชั้นนอกและชั้นใน เป็นสาเหตุให้ไม่สามารถลดอุณหภูมิลงไปยังระดับที่ต้องการทำให้สิ้นเปลืองฮีเลียมเหลวหรือไนโตรเจนเหลว และป้องกันการรั่วของไอน้ำหรือก๊าซอื่นๆบนผิวของสาร ที่อาจทำให้การวัดผิดพลาดหรือทำการวัดในครั้งต่อไปไม่ได้

ภายในช่องว่างชั้นกลางนี้มีภาชนะวงแหวนทรงกระบอก(cylindrical ring) แขนงอยู่ในตอนกลาง ภายในจะเป็นที่บรรจุไนโตรเจนถ้าของเหลวในท่อชั้นในเป็นฮีเลียม จะช่วยลดความแตกต่างอุณหภูมิของท่อชั้นในและอุณหภูมิในบริเวณรอบๆท่อชั้นใน ทำให้ลดอัตราการระเหยของฮีเลียมและช่วยรักษาความคงตัวของอุณหภูมิ ชั้นสารจะวางอยู่บริเวณปลายสุดของท่อชั้นใน ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับหัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ (Copper-Copper-nickle) และช่วยลดความร้อนที่จะควบคุมอุณหภูมิบริเวณชั้นสารให้คงที่ตลอดเวลา สายสัญญาณของระบบวัดและระบบควบคุมอุณหภูมิจะถูกคัปปลิง(coupling) ผ่านพีดทิว(feedthrough) ด้านบนของห้องวัด

สำหรับพีดทิวของเทอร์โมคัปเปิลจะใช้แยกกับสัญญาณอื่นๆ เนื่องจากต้องการให้บริเวณนี้เป็นรอยต่ออ้างอิง(reference junction)ของเทอร์โมคัปเปิล ในขณะที่ทำการวัดบริเวณนี้จะถูกหล่อด้วยน้ำแข็งให้มีอุณหภูมิใกล้ 0 องศาเซลเซียสอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นเทคนิคสำหรับการวัดอุณหภูมิให้มีความถูกต้อง

โปรแกรมควบคุมการวัด เก็บข้อมูล และ ประมวลผล

โปรแกรมแบ่งเป็น 2 ส่วนคือโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ และโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์ ทั้งสองส่วนได้รับการออกแบบให้ทำงานประสานงานกันโดยใช้เทคนิคของการขัดจังหวะ(Interrupt) การทำงานของโปรแกรมทั้งสองส่วนมีดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

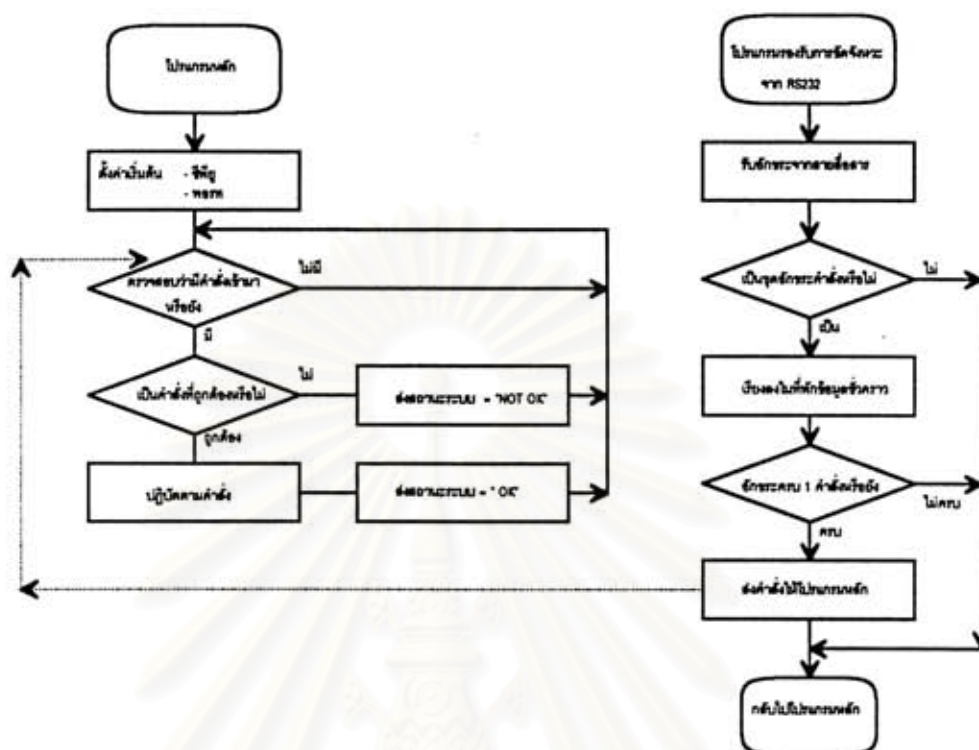
โปรแกรมได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลีตระกูล MCS51 จากผังการทำงานโปรแกรมดังรูปที่3.12 ตัวโปรแกรมแบ่งเป็นสองส่วนคือ

ส่วนโปรแกรมรองรับการขัดจังหวะ(interrupt service program)จากสายสื่อสารRS232 ในขณะที่รับ-ส่งข้อมูล ซึ่งจะทำการตรวจสอบอักขระที่ส่งเข้ามา ถ้าเป็นชุดอักขระคำสั่งจะมีการรับเข้ามาจนครบแล้วส่งให้กับตัวโปรแกรมหลักเพื่อนำไปปฏิบัติงาน หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานแล้วโปรแกรมขัดจังหวะจะส่งข้อความแสดงสถานะของการทำงานกลับไปยังไมโครคอมพิวเตอร์

ส่วนโปรแกรมหลัก โปรแกรมจะเริ่มทำงานเมื่อมีการจ่ายไฟเข้าเครื่อง โปรแกรมจะทำการตั้งค่าเริ่มต้นของการทำงานภายในระบบให้กับซีพียูและพอร์ท หลังจากนั้นจะวนรอบคอยการขัดจังหวะจากสายสื่อสาร เมื่อมีการขัดจังหวะจากสายสื่อสารและโปรแกรมรองรับการขัดจังหวะส่งคำสั่งที่ได้รับมายังโปรแกรมหลักๆจะเริ่มปฏิบัติตามคำสั่งนั้นจนเสร็จและส่งสถานะของการทำงานกลับไปให้โปรแกรมขัดจังหวะส่งต่อไป

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมตรวจสอบการทำงานแม่เหล็กซึ่งจะคอยปิดแม่เหล็กเมื่อขาดการติดต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์นานกว่า15นาที ซึ่งป้องกันขดลวดแม่เหล็กไหม้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของโปรแกรมควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

2. โปรแกรมบนไมโครคอมพิวเตอร์

ประกอบด้วยตัวโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษาปาสคาลและโปรแกรมรองรับการขัดจังหวะภาษาแอสเซมบลีตระกูล 8088 ตัวโปรแกรมได้รับการออกแบบให้สามารถติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางโปรแกรมรองรับการขัดจังหวะจากสายสื่อสาร RS232 ซึ่งจะคอยส่งและรับข้อมูลความเร็วสูงจากสายสื่อสาร RS232 การทำงานของตัวโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

2.1 โปรแกรมควบคุมการวัด

ทำหน้าที่ควบคุมระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ให้ทำการวัดข้อมูลและเก็บข้อมูลตามที่ผู้วัดต้องการ ซึ่งแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบคือการควบคุมการวัดในแบบอัตโนมัติ (automatic control) และแบบผู้ใช้ควบคุมการวัดเอง (manual control) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

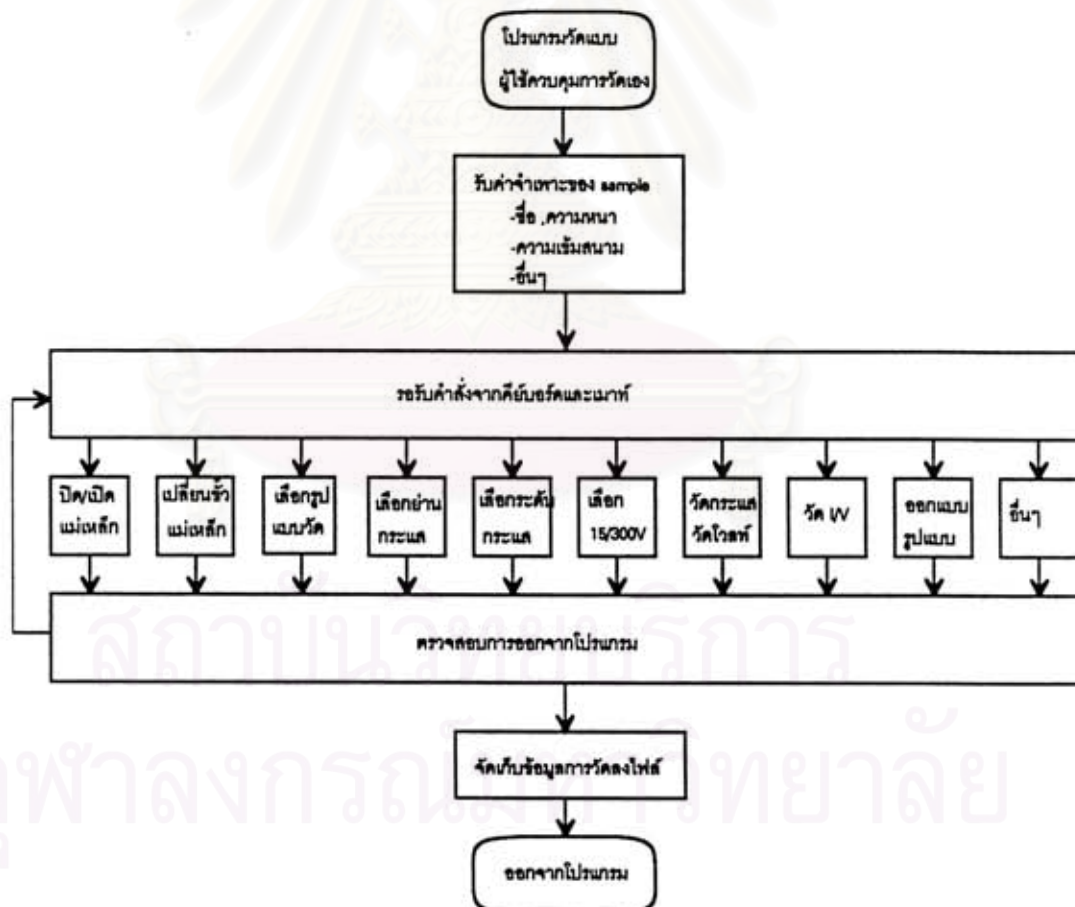
ก) การควบคุมการวัดในแบบผู้ใช้ควบคุมการวัดเอง (manual control)

การวัดเช่นนี้ผู้ใช้ระบบวัดควบคุมอุปกรณ์วัดได้ทุกส่วนได้ด้วยการสั่งการผ่านคีย์บอร์ดหรือเมาท์ ทำให้การวัดมีความยืดหยุ่นสามารถวัดข้อมูลด้วยรูปแบบที่ต่างออกไปจากระบบ

อัตโนมัติ ความสามารถของโปรแกรมการวัดแบบให้ผู้ใช้ควบคุมการวัดเองคือ

- 1) ใช้สำรวจลักษณะของสภาพต้านทานของสารในเบื้องต้น และการหาระดับกระแสควบคุมที่เหมาะสมกับสารตัวอย่างก่อนการวัดแบบอัตโนมัติ
- 2) ใช้ซ่อมหรือตรวจสอบผลการวัดที่ได้จากการวัดแบบอัตโนมัติในบางกรณีที่ต้องการ
- 3) ใช้ประยุกต์รูปแบบการวัดที่ต่างไปจากวานเดอร์พาวเทคนิคและฮอลล์บาร์เทคนิค เช่นการวัดในแบบ two point probe และ four point probe ได้ดี
- 4) ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์กระแสความต่างศักย์(I/V characteristic) ของสารกึ่งตัวนำภายใต้สภาวะต่างๆเช่นที่อุณหภูมิต่ำ หรือ มีสนามแม่เหล็ก

การทำงานของโปรแกรมในส่วนนี้ทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้และส่งผ่านการทำงานตามคำสั่งนั้นไปยังอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเหมือนกับผู้ใช้ทำการวัดด้วยตัวเอง โดยะแกรมการทำงานได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โดยะแกรมโปรแกรมวัดแบบให้ผู้ใช้วัดเอง

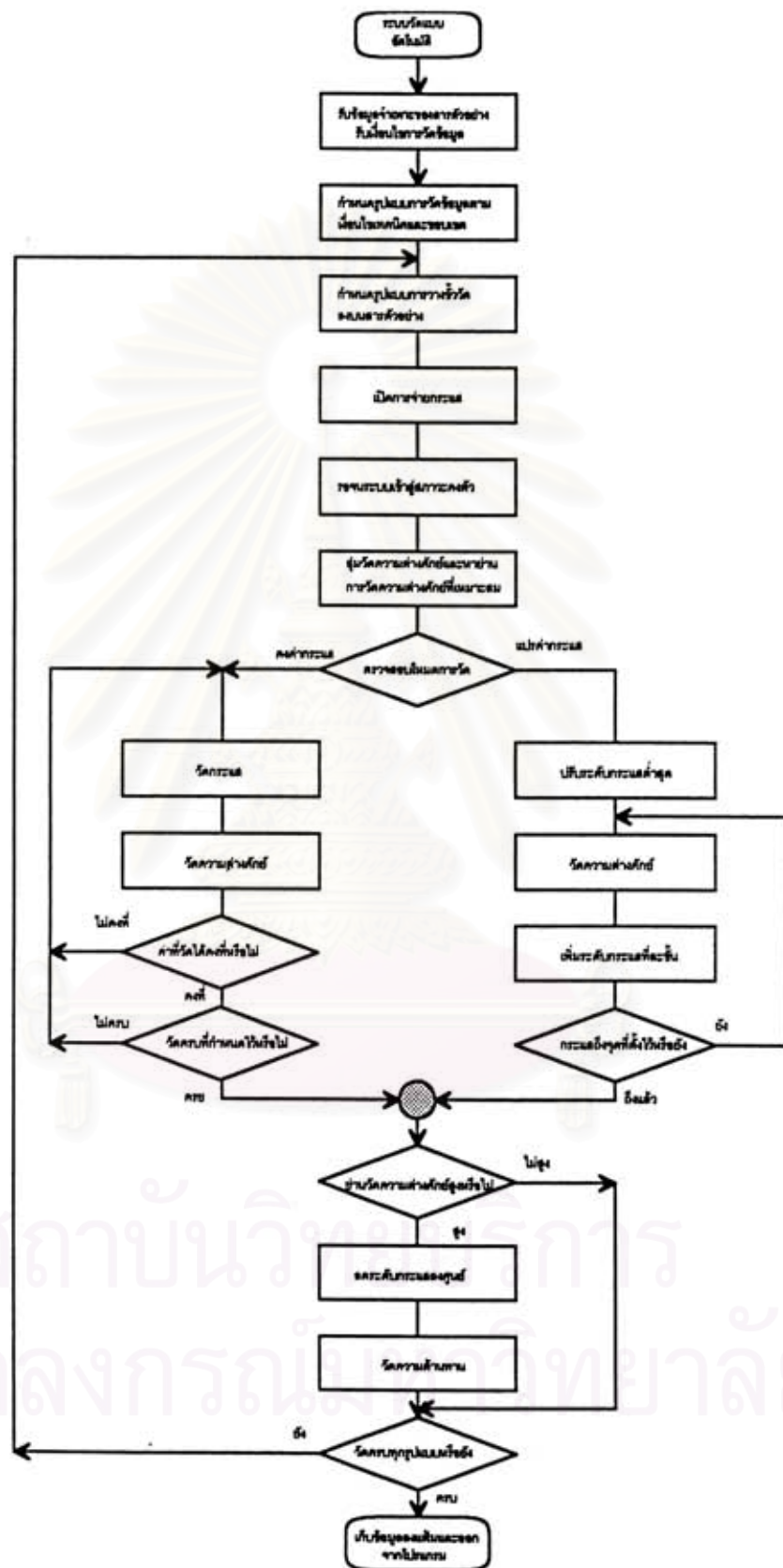
ข) การควบคุมการวัดแบบอัตโนมัติ (automatic control)

การวัดแบบนี้ผู้ใช้จะต้องป้อนเงื่อนไขการวัดให้กับโปรแกรมก่อนเข้ากระบวนการวัด และหลังจากนั้นระบบวัดจะทำการวัดเองจนเสร็จกระบวนการซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมและเงื่อนไขการวัด ข้อดีของการวัดแบบอัตโนมัติคือผู้ใช้ไม่ต้องดำเนินการวัดเองซึ่งสะดวก,ปลอดภัยและมีความถูกต้องมาก เนื่องจากโปรแกรมได้รับการออกแบบให้มีการป้องกันความผิดพลาดจากการวัดและมีการกำหนดจังหวะเวลาในแต่ละกระบวนการย่อยอย่างเหมาะสม จากผังการทำงานโปรแกรมรูปที่ 3.14 เงื่อนไขของการวัดที่ผู้ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมคือ

- 1 ข้อมูลจำเพาะของสารที่จะทำการวัดคือ ชื่อสาร,ความหนา,อุณหภูมิและสนามแม่เหล็ก
- 2 ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวงจรกระแสคงที่ เนื่องจากกระแสที่ผ่านสารยิ่งสูงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะยิ่งมีความถูกต้องมากขึ้นแต่ต้องไม่มากจนทำให้สารเกิดความร้อนและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วแหล่งจ่ายกระแสต้องไม่เกินค่าแรงดันสูงสุดที่วงจรควบคุมกระแสยังทำงานอยู่ได้
- 3 โหมด(mode) การวัดข้อมูลกระแสและความต่างศักย์สามารถเลือกได้ 2 โหมดคือ
 - โหมดคงค่ากระแสและเพิ่มจำนวนรอบในการวัดความต่างศักย์
 - โหมดแปรค่ากระแสและวัดความต่างศักย์ขณะใด ๆ
- 4 วิธีของการวัด ระบบวัดอัตโนมัติรองรับการวัดได้ 2 วิธีคือ วานเดอร์พาวและฮอลล์บาร์
- 5 ขอบเขตของการวัดที่มี 2 แบบคือ แบบวัดเฉพาะข้อมูลสภาพด้านทานและแบบวัดข้อมูลสภาพเคลื่อนที่ได้

หลังจากการรับเงื่อนไขและวิธีการวัดแล้ว การวัดจะเริ่มขึ้นโดยพิจารณาที่วิธีวัดและขอบเขตการวัด โปรแกรมจะสั่งให้วงจรสวิตช์เริ่มกำหนดรูปแบบของวงจรสวิตช์ตั้งแต่รูปแบบแรก รวมทั้งการปิด-เปิดและกำหนดขั้วแม่เหล็กและจ่ายกระแสตามระดับควบคุมที่ตั้งไว้ หลังจากนั้นจะหน่วงเวลาจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและ สุ่มวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจนพบย่านการวัดความต่างศักย์ที่เหมาะสมโปรแกรมจะเข้าสู่กระบวนการวัดข้อมูล โดยโปรแกรมจะตรวจสอบโหมดการวัดจากเงื่อนไข

ถ้าโหมดการวัดเป็นแบบแปรค่ากระแส โปรแกรมจะไปตั้งต้นค่ากระแสควบคุมที่ระดับต่ำสุดและจะค่อยๆเพิ่มระดับกระแสขึ้นทีละขั้น ในขณะที่เดียวกันจะวัดความต่างศักย์จนกระทั่งกระแสถึงจุดสูงสุดที่ตั้งไว้ ข้อมูลของกราฟกระแสและความต่างศักย์แต่ละจุดจะได้รับการคำนวณหาค่าความชันด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) และจะได้พารามิเตอร์ 3 ค่าคือ



รูปที่ 3.14 โปรแกรมควบคุมการวัดแบบอัตโนมัติ

$$\text{slope } V-I = \frac{m \sum_{i=1}^m I_i V_i - (\sum_{i=1}^m I_i \sum_{i=1}^m V_i)}{m \sum_{i=1}^m I_i^2 - (\sum_{i=1}^m I_i)^2} \quad (3.4)$$

$$\text{slope } I-V = \frac{m \sum_{i=1}^m I_i V_i - (\sum_{i=1}^m I_i \sum_{i=1}^m V_i)}{m \sum_{i=1}^m V_i^2 - (\sum_{i=1}^m V_i)^2} \quad (3.5)$$

$$\text{และ } R = \text{slope } V-I \cdot \text{slope } I-V \quad (3.6)$$

เมื่อ M คือจำนวนจุดที่ทำการวัด

และ (I_i, V_i) คือจุดข้อมูลที่วัดได้จุดที่ i

จะสังเกตได้ว่าในการวัดนี้ตัวแปรอิสระคือกระแส ดังนั้นความชันของกราฟกระแส-ความต่างศักย์ (slope V-I) คือค่าความต้านทานที่สามารถใช้แทนนิยาม 2.62, 2.63 หรือ 2.68 ได้ ซึ่งเป็นความต่างศักย์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสที่จ่ายออกไป ส่วนค่า slope I-V และ R จะใช้แสดงถึงค่าความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ทั้งสอง โปรแกรมจะบันทึกค่ากระแสที่สูงสุด (I_{max}) ตลอดการวัดและผลคูณของ slope V-I กับกระแสสูงสุด ($I_{max} \cdot \text{slope } V-I$)

ถ้าโหมดการวัดเป็นแบบคงค่ากระแส โปรแกรมจะวนรอบวัดกระแสและความต่างศักย์จนกระทั่งครบจำนวนรอบตามที่กำหนดไว้หรือเมื่อพบว่าสัญญาณมีความนิ่งมากพอจึงออกจากกรวนรอบ

ในกรณีที่ย่านการวัดความต่างศักย์จากทั้งสองโหมดอยู่ในช่วงที่ความต้านทานภายในของเครื่องวัดมีค่าไม่มากพอ โปรแกรมจะปิดกระแสและวัดความต้านทานผ่านขั้ววัดความต่างศักย์เพื่อนำไปปรับแก้ผลการวัดในขณะประมวลผล หลังจากนั้นโปรแกรมจะปิดการจ่ายกระแสซึ่งเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการวัดใน 1 รูปแบบ และจะเริ่มวนรอบการวัดในรูปแบบต่อไปจนครบตามขอบเขตและข้อมูลจากการวัดจะถูกเก็บลงแฟ้มข้อมูลเพื่อรอการจัดการต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 โปรแกรมจัดการข้อมูล

เพิ่มข้อมูลที่ได้จากการวัดในช่วงต้นผู้วัดสามารถกระทำกับเพิ่มข้อมูลนี้ได้ 4 แบบ

- การขูดและแก้ไขข้อมูลในแฟ้ม
- การลบเพิ่มข้อมูล
- การประมวลผลข้อมูล
- การพิมพ์เพิ่มข้อมูลหรือเพิ่มผลการคำนวณ

เมื่อมีการประมวลผลข้อมูล โปรแกรมจะอ่านข้อมูลจากแฟ้มและตรวจสอบเงื่อนไขการวัดของข้อมูล ถ้าเป็นข้อมูลที่วัดโดยโปรแกรมควบคุมการวัดโดยผู้ใช้ โปรแกรมจะให้ผู้ใช้คำนวณเอง ถ้าวัดโดยการควบคุมแบบอัตโนมัติการประมวลผลจะเริ่มต้น โดยเริ่มจากการคำนวณปรับแก้ค่าที่วัดได้โดยใช้ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัด หลังจากนั้นจึงคำนวณสภาพต้านทานด้วยชุดสมการจากตาราง 3.2 หรือ 3.5 ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้วัด

ส่วนสำคัญของโปรแกรมนี้คือการคำนวณค่าปรับแก้ (correction factor) จากสมการ 2.66 ที่เป็นกรณีของการวัดในแบบแวนเดอร์พาว ซึ่งคำนวณจากโปรแกรมโดยใช้วิธีคำนวณแบบ bisection method [14] หลังจากที่โปรแกรมคำนวณสภาพต้านทานและ สภาพต้านทานเฉลี่ยแล้ว โปรแกรมจะตรวจสอบขอบเขตของการวัดว่า มีการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ด้วยหรือไม่ ถ้ามีจะเริ่มการคำนวณด้วยชุดสมการจากตาราง 3.3 หรือ 3.6 ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้วัด พร้อมทั้งตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นแบบ P หรือ N โดยการตรวจสอบทิศของกระแสที่เปลี่ยนแปลงหลังจากเปิดสนามแม่เหล็ก ผลการคำนวณสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์และค่าเฉลี่ยจะถูกนำไปคำนวณความเข้มพาหะในตอนท้าย และบันทึกผลการคำนวณทั้งหมดลงเพิ่มข้อมูลต่อจากข้อมูลการวัดที่ได้ในตอนแรก

2.3 โปรแกรมส่วนอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วย

- โปรแกรมตั้งระดับกระแสควบคุม
- โปรแกรมออกแบบขั้นตอนการวัดในแบบอัตโนมัติ
- โปรแกรมทดสอบระบบสวิทช์ ซึ่งทำการตรวจสอบการทำงานของขดลวดรีเลย์, วัดความต้านทานหน้าสัมผัส พร้อมทั้งระบุตำแหน่งรีเลย์และหน้าสัมผัสที่เสีย
- โปรแกรมควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ระยะไกลภายในระบบ LAN

ขั้นตอนการใช้เครื่องมือวัด

เมื่อผู้วัดต้องการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยระบบวัดนี้ ขั้นตอนที่ผู้วัดควรปฏิบัติคือ กระบวนการก่อนการวัด ประกอบด้วยขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

- 1) เลือกวิธีวัดให้เหมาะสมกับสมบัติทางกายภาพของสารและความยากง่ายของการเตรียมรูปทรง
- 2) เตรียมชิ้นสารให้ได้รูปทรงและขนาดมาตรฐาน
- 3) เตรียมขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิกลบนชิ้นสาร
- 4) บรรจุชิ้นสารลงในจุดติดชิ้นสารภายในห้องวัดพร้อมทั้งเชื่อมสายวัดจากระบบวัดลงบนขั้วสัมผัสของชิ้นสาร
- 5) ในกรณีที่ต้องการวัดกระทำภายใต้อุณหภูมิต่ำจะต้องมีบีมปีให้ภายในมีความดันต่ำมาก ๆ และ รักษาอุณหภูมิรอบชิ้นสารให้คงที่ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

กระบวนการขณะใช้ระบบวัด

- 1) เมื่อทำการวัดในครั้งแรกจะต้องหาระดับกระแสผ่านสารตัวอย่างที่เหมาะสม โดยเข้าสู่โปรแกรมควบคุมการวัดในแบบผู้ใช้ควบคุมเองและเริ่มจ่ายกระแสผ่านสารตัวอย่างและวัดความต่างศักย์ โดยเลือกกระแสต่ำที่สุดแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยสังเกตลักษณะการแปรผันของความต่างศักย์ที่วัดได้กับกระแสระดับกระแสควบคุมพิจารณาได้จากความเป็นเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์และกระแส และกำลังงานที่ตกคร่อมชิ้นสาร
- 2) ตั้งค่าระดับกระแสควบคุม
- 3) เข้าสู่การวัดแบบอัตโนมัติโดยเริ่มจากการป้อนเงื่อนไขการวัดให้กับโปรแกรมแล้วจึงเริ่มกระบวนการวัดแบบอัตโนมัติ
- 4) ตรวจสอบผลการวัด และ เข้าสู่โปรแกรมประมวลผลการวัด



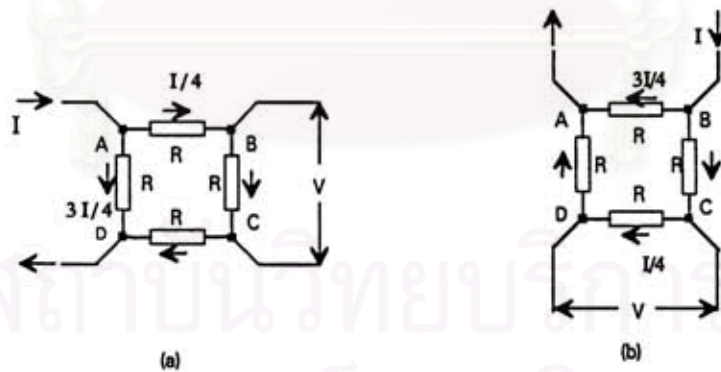
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการนำระบบวัดไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารตัวอย่างด้วยเงื่อนไขของการทดลองต่างๆดังมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

การทดสอบระบบวัดเบื้องต้นด้วยวงจรตัวต้านทาน

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานและความถูกต้องของระบบวัดโดยเฉพาะส่วนวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเป็นการตรวจสอบแนวคิดเกี่ยวกับการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของการวัดเนื่องจากความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ วงจรตัวต้านทานที่นำมาใช้วัดประกอบด้วยตัวต้านทานค่าเท่ากัน 4 ตัว ต่อวงจรเลียนแบบรูปทรงของสารตัวอย่างตามวิธีวัดแบบวานเดอร์พาว



รูปที่ 4.1 วงจรตัวต้านทาน

พิจารณาวงจรตัวต้านทานจากรูปที่ 4.1 ตัวต้านทานทุกตัวมีค่าเท่ากับ R เมื่อจ่ายกระแส I ตามวงจร 4.1a เราทราบว่า

$$I_{bc} = \frac{I}{4} \quad \text{และ} \quad V_{bc} = \frac{I}{4}R$$

$$\text{จะได้ } R_{ADBC} = \frac{R}{4} \quad (4.1)$$

เมื่อจ่ายกระแสผ่านกึ่ง AB ในวงจร 4.1b ทำนองเดียวกันจะได้

$$R_{BACD} = \frac{R}{4} \quad (4.2)$$

จากการวัดสภาพต้านทานด้วยวิธีแวนเดอร์พาวของชิ้นสารที่มีความหนาเป็น t จะได้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสมการ 2.65 คือ

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left[\frac{R}{4} \right] \quad (4.3)$$

ถ้าเลือก $t = \frac{4 \ln 2}{\pi}$ หรือ 0.88 ซม. เพื่อความสะดวกในการวัดและวิเคราะห์ซึ่งจะได้

$$\rho = R \quad (4.4)$$

เราจะวัดสภาพต้านทานของวงจรตัวต้านทานต่างๆกันจำนวน 11 ชุดที่ทำจากตัวต้านทานค่าตั้งแต่ $1\Omega - 20\text{ M}\Omega$ 5% และเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานที่วัดได้ (ρ) กับ ค่าความต้านทาน (R) ที่ใช้ ผลการวัดแสดงไว้ในตาราง 4.1 และกราฟรูปที่ 4.2 สำหรับกราฟ 4.3 ได้แสดงผลการวัดเมื่อความต้านทาน R มีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานของโวลท์มิเตอร์ ค่าสภาพต้านทานที่วัดได้แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่วัดโดยไม่มีการปรับแก้ความผิดพลาด (ρ_{measured}) และกลุ่มที่วัดโดยมีการปรับแก้ความผิดพลาด (ρ_{correct}) ผลการวัดทั้งสองได้แสดงเปรียบเทียบ กับค่าจากการคำนวณ ρ_{cal} โดยที่

$$\rho_{\text{cal1}} = R \left[\frac{R_{\text{meter}}}{R_{\text{meter}} + R_{\text{sample}}} \right] \quad \text{กรณีไม่มีการปรับแก้}$$

$$\text{และ } \rho_{\text{cal2}} = R \quad \text{กรณีมีการปรับแก้}$$

เมื่อ R_{meter} ความต้านทานภายในของโวลท์มิเตอร์

และ R_{sample} คือ ความต้านทานภายในของวงจรตัวต้านทานที่วัดผ่านขั้วความต่างศักย์

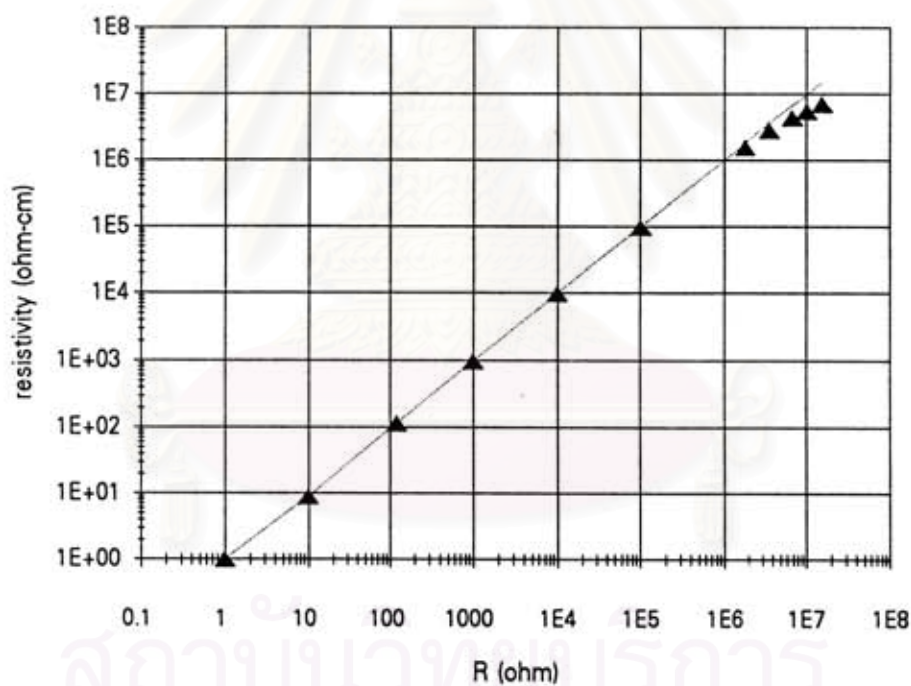
ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการปรับแก้ผลการวัดความต่างศักย์ด้วยการวัดความต้านทานจาก

บทที่ 3 (สมการ 3.3) ทำให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นในการทำการวัดที่จะกล่าวถึงในส่วนต่อไปจึงใช้การปรับแก้ด้วยวิธีนี้

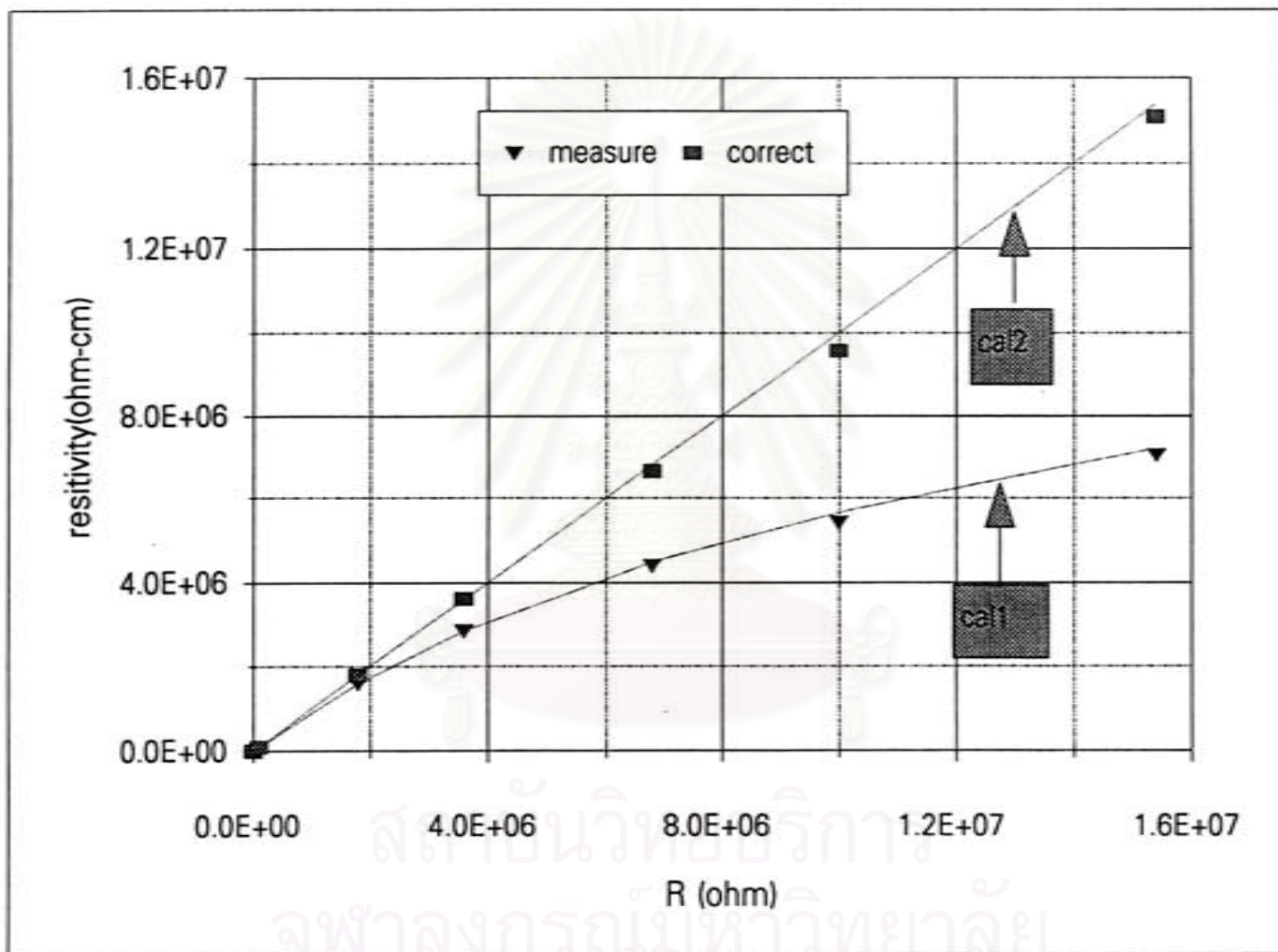
| R (ohm) | resistivity (ohm-cm) | | Voltage range | resistance (ohm) | | resistivity (ohm-cm) | |
|------------|----------------------|----------|------------------|------------------|----------|----------------------|----------|
| | measure | correct | | V meter | sample* | cal1 | cal2 |
| 1.00E+00 | 1.01E+00 | 1.01E+00 | 1 | 1.00E+09 | 7.30E-01 | 1.00E+00 | 1.00E+00 |
| 1.00E+01 | 9.00E+00 | 9.00E+00 | 1 | 1.00E+09 | 7.30E+00 | 1.00E+01 | 1.00E+01 |
| 1.20E+02 | 1.16E+02 | 1.16E+02 | 1 | 1.00E+09 | 7.90E+01 | 1.20E+02 | 1.20E+02 |
| 1.00E+03 | 9.75E+02 | 9.75E+02 | 3 | 1.10E+07 | 7.40E+02 | 1.00E+03 | 1.00E+03 |
| 1.00E+04 | 9.76E+03 | 9.76E+03 | 3 | 1.10E+07 | 7.35E+03 | 9.99E+03 | 1.00E+04 |
| 1.00E+05 | 9.83E+04 | 9.90E+04 | 3 | 1.10E+07 | 7.40E+05 | 9.37E+04 | 1.00E+05 |
| 1.80E+06 | 1.59E+06 | 1.80E+06 | 4 | 1.01E+07 | 1.35E+06 | 1.59E+06 | 1.80E+06 |
| 3.60E+06 | 2.84E+06 | 3.61E+06 | 4 | 1.01E+07 | 2.72E+06 | 2.84E+06 | 3.60E+06 |
| 6.80E+06 | 4.40E+06 | 6.64E+06 | 4 | 1.01E+07 | 5.15E+06 | 4.50E+06 | 6.80E+06 |
| 1.00E+07 | 5.43E+06 | 9.57E+06 | 4 | 1.01E+07 | 7.71E+06 | 5.67E+06 | 1.00E+07 |
| 1.54E+07 | 7.03E+06 | 1.51E+07 | 4 | 1.01E+07 | 1.15E+07 | 7.20E+06 | 1.54E+07 |

* วิกฤตระหว่างจุดวัดความต่างศักย์บนสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตัวต้านทาน 11 จุด



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานที่วัดโดยไม่มีกรปรับแก้และค่าตัวต้านทาน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลสภาพต้านทานเปรียบกับผลการวัดปกติ

การเตรียมสารตัวอย่างเพื่อการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

สารตัวอย่างที่จะใช้ในศึกษาทดลองในหัวข้อต่อไปคือ GaAs, InSb และ CuInSe_2 สำหรับสาร GaAs, InSb ที่ใช้ทำการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7 ซม หรือเรียกว่าแผ่นเวเฟอร์ (wafer) การปรับรูปทรงของสารให้มีรูปทรงมาตรฐานสำหรับการวัดด้วยวิธีวานเดอร์พาวหรือฮอลล์บาร์ ประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

1. การตัดแผ่นเวเฟอร์

สาร GaAs, InSb เมื่อทำให้แตกออก รอยแตกจะเป็นแนวเดียวกันหรือตั้งฉากกับระนาบของผลึก การตัดสารตัวอย่างอาจทำได้ด้วยวิธีง่ายที่สุดคือการใช้เครื่องตัดเป็นแท่งโลหะปลายแหลมแข็งที่เรียกว่า SCRIBER ตัดด้วยหลักการเดียวกับการตัดกระจก



รูปที่ 4.4 แนวตัดสารตัวอย่างจากแผ่น GaAs หรือ InSb

การตัดโดยวิธีนี้จะได้ชิ้นสารที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่านั้น โดยสังเกตได้จากรอยแตกของแผ่นที่มีอยู่แล้วแนวตัดควรตั้งฉากหรือขนานกับรอยนี้ด้วย ค่อยๆกรีดตามแนวตัดด้วยเครื่องมือตัดพอให้เป็นรอยเส้นตรง หลังจากนั้นกดเบาด้วยแรงตามแนวตัดจากด้านหลังของแผ่นจนแผ่นสารแตกออกด้วยด้ามของเครื่องมือตัด โดยทั่วไปขนาดของสารตัวอย่างสำหรับการวัดด้วยวิธีวานเดอร์พาวจะมีได้ตั้งแต่ 3×3 ถึง 5×5 มม. และสำหรับการวัดแบบฮอลล์บาร์จะเป็นแถบขนาด 1×5 ถึง 2×10 มม.

ในกรณีที่ต้องการรูปทรงที่เป็นแผ่นกลมจะต้องใช้การขัดเข้าช่วย โดยตัดให้ได้รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการเล็กน้อย วางแผ่นสารลงบนหน้าตัดของแท่งโลหะทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดของสารที่ต้องการ โดยยึดสารให้ติดด้วยเทียนไซและค่อยๆขัดส่วนที่อยู่นอกแนวหน้าตัดทรงกระบอกด้วยกระดาษทรายละเอียดจนหมด

นอกจากนี้เราอาจตัดแผ่นเวเฟอร์ โดยวิธีกัดด้วยสารละลายของกรดซัลฟูริก และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยปิดบริเวณที่ไม่ต้องการกัดด้วยวัสดุทนกรดเช่น แลคเกอร์ หรือ การปิดผิวหน้าด้วยฟิล์มไวแสงที่มีสมบัติดังกล่าว รูปทรงที่เตรียมได้จากวิธีนี้ทำได้ไม่มีจำกัดขึ้นอยู่กับรูปร่างของแผ่นที่บังแสงในขณะที่ถ่ายฟิล์ม

2. กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้า

การทำความสะอาดผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ตัดได้ ซึ่งประกอบด้วยสารละลายในสารละลาย TCE (trichloroethylene), แชนในอะซีโตน หลังจากนั้นล้างด้วยเมธานอลและน้ำปลอดไอออน (de-ionize water) โดยกระบวนการทั้งหมดนี้ทำในเครื่องอัลตราซาวด์ (ultrasonic bath) และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

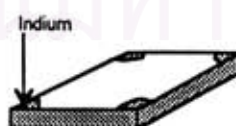
สำหรับสาร CuInSe_2 จะได้รับการเตรียมให้เป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการระเหยในระบบสุญญากาศ (Evaporation technique) [16] ซึ่งจะได้ฟิล์มบางรูปทรงมาตรฐานที่พร้อมสำหรับวัดปรากฏการณ์ฮอลล์และสะอาดอยู่แล้วจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการตัดและทำความสะอาดอีก

กระบวนการชุบไฟฟ้าและการแอนนัล (Annealing) สารตัวอย่าง

ชิ้นสารที่ผ่านกระบวนการล้างสะอาดแล้วจะนำมาชุบไฟฟ้าซึ่งมี 2 วิธีคือ

1. การชุบไฟฟ้าที่ทำด้วยกาวเงิน วิธีนี้ใช้สำหรับสารตัวอย่าง CuInSe_2 โดยป้ายกาวเงินลงให้ทั่วบริเวณชุบไฟฟ้าบนสารตัวอย่าง และนำไปวางใต้หลอดไฟฟ้าไส้ทั้งสแตนขนาด 60 - 100 วัตต์ให้ห่างจากหลอดประมาณ 1 ฟุต ทิ้งไว้ 15 - 20 นาทีและนำไปวางในที่มืดสนิทอีกอย่างน้อย 1-2 ชม.

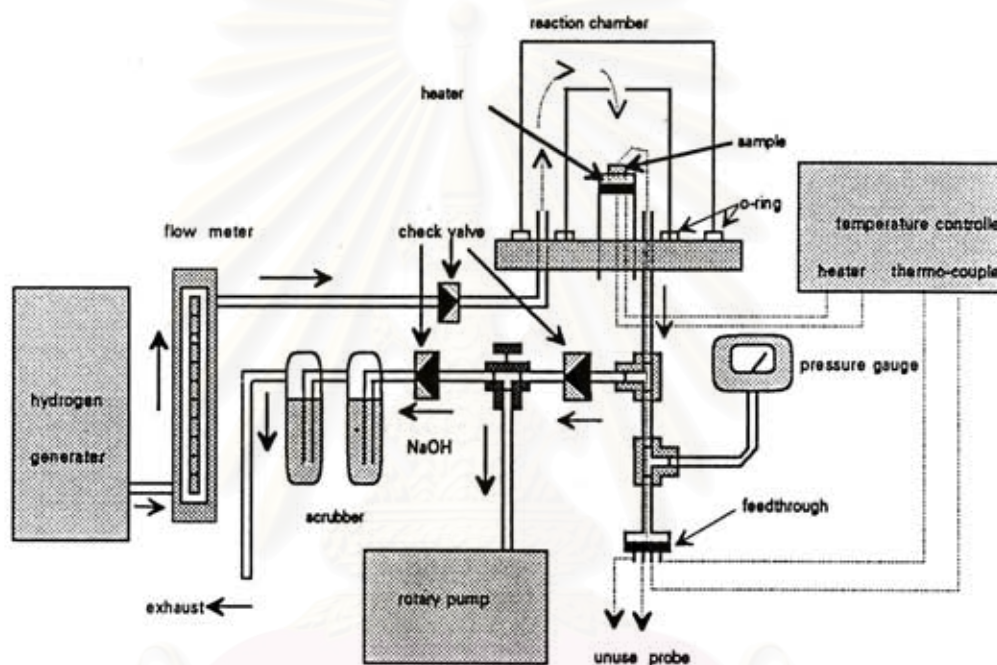
2. การชุบไฟฟ้าที่ทำด้วยโลหะอินเดียม วิธีนี้ใช้สำหรับสารตัวอย่าง GaAs และ InSb โดยใช้หัวแรงขนาด 5 วัตต์ที่มีปลายขนาดเล็ก บัดกรีโลหะอินเดียมลงบนผิวของสารตัวอย่าง พยายามทำให้ได้จุดชุบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กและชิดเส้นขอบมากที่สุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการวัด



รูปที่ 4.5 สารตัวอย่างหลังการชุบไฟฟ้า Indium

ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็น GaAs จุดขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นจะยังไม่เป็นโอห์มมิก(ohmic) เนื่องจากเกิดกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อของโลหะ In และสารตัวอย่างดังกล่าวมาแล้วจากบทที่ 2 เราจะต้องแอนนัลสารตัวอย่าง GaAs ที่ได้ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนที่มีการควบคุมอุณหภูมิของสารเพื่อให้จุดขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิกอย่างสมบูรณ์ สำหรับ InSb ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแอนนัลเนื่องจากมีความต้านทานของรอยต่อขั้วสัมผัสต่ำอยู่แล้ว

การแอนนัล GaAs ทำในระบบแอนนัลที่ประดิษฐ์ขึ้นและมีไดอะแกรมดังรูปที่ 4.6



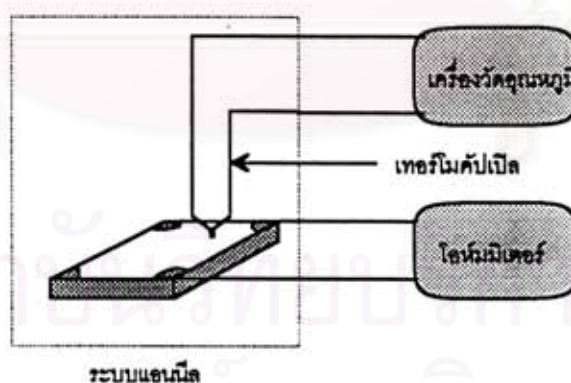
รูปที่ 4.6 ระบบแอนนัล GaAs

ระบบแอนนัลประกอบด้วยห้องปฏิกิริยา (reaction chamber) ที่เป็นโถแก้ว 3 ชั้นวางครอบซ้อนกัน ชั้นในสุดทำจากท่อแก้วควอทปลายปิดมีผิวหน้าตัดเรียบเป็นที่วางสารตัวอย่าง ท่อแก้วนี้ยึดติดอยู่กับฐานทองเหลืองด้วยโอริง ปลายท่อมีขดลวดความร้อน 40 วัตต์ขนาดเล็กขดอยู่ภายใน แก้วชั้นกลางที่ทำจากบิกเกอร์แก้วไพเรกซ์ (pyrex) ที่ตัดขอบปากและเจาะรูกับบิกเกอร์เพื่อให้เป็นทางเข้าออกของก๊าซ แก้วนี้วางครอบและยึดติดกับฐานด้วยโอริง มีหน้าที่บังคับก๊าซที่ออกจากท่อนำก๊าซให้ผ่านเข้าและกระทบผิวสารตัวอย่างในแนวตั้งจาก ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้แอนนัล ผลิตมาจากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen generator) ส่งผ่านท่อสแตนเลสและวาล์วกำหนดทิศทาง(check valve) โดยมีมิเตอร์ควบคุมอัตราการไหล(flow meter)เป็นตัวควบคุมการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผ่านห้องปฏิกิริยา

ก๊าซที่ออกจากห้องปฏิกิริยาจะไหลผ่านหลอดดักก๊าซพิษ (scrubber) บรรจุสารละลายของ NaOH (10 molar) ที่จะดักก๊าซพิษที่ออกมาจากสารตัวอย่างก่อนออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ทางออกของห้องปฏิกิริยายังแยกออกไปสู่ระบบปั๊มสุญญากาศ เพื่อให้ภายในห้องวัดเป็นสุญญากาศ ก่อนเติมก๊าซไฮโดรเจน

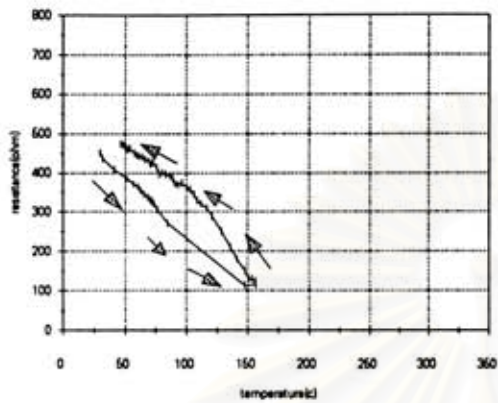
กระบวนการแอนนیلเริ่มจากการปั๊มภายในห้องปฏิกิริยาให้เป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเข้าห้องปฏิกิริยาจนเต็มและทำซ้ำกระบวนการนี้อีก 2 ครั้งเพื่อให้ในห้องปฏิกิริยามีเพียงก๊าซไฮโดรเจนเท่านั้น หลังจากนั้นควบคุมก๊าซให้ไหลเข้าช้าๆ โดยสังเกตจากหลอดดักก๊าซจะเกิดฟองอากาศในอัตรา 1-2 ฟองต่อวินาที ซึ่งพร้อมที่จะทำการแอนนิลสารตัวอย่างเพิ่มระดับอุณหภูมิของสารขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนถึงช่วง 250 - 350 เซลเซียส อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิแอนนิล (Anneal temperature) และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 5 นาทีจึงลดอุณหภูมิลง หลังจากนั้นทดสอบขั้วสัมผัสอินทรีย์ที่เตรียมได้โดยใช้อินทรีย์เมตรวัดความต้านทานผ่านขั้วสัมผัสคู่ที่ใกล้กันทั้ง 4 คู่ ความต้านทานที่วัดได้แต่ละคู่จะต้องต่ำและใกล้เคียงกัน

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานของขั้วสัมผัสตามอุณหภูมิ จึงทำการทดลองแอนนิลสารตัวอย่างแผ่นสี่เหลี่ยม GaAs จำนวน 4 ชั้นที่ตัดมาจากแผ่นเวเฟอร์เดียวกันและมีขนาดเท่ากันทุกชั้น ทำความสะอาดและติดขั้วไฟฟ้าอินทรีย์ตามวิธีที่กล่าวมาข้างต้น บรรจุเข้าสู่ห้องปฏิกิริยาของระบบแอนนิลพร้อมกับโยงสายจากจุดขั้วไฟฟ้าออกสู่อินทรีย์เมตรที่อยู่นอกกระบบผ่านพีดทรู (feedthrough) ที่เหลืออยู่

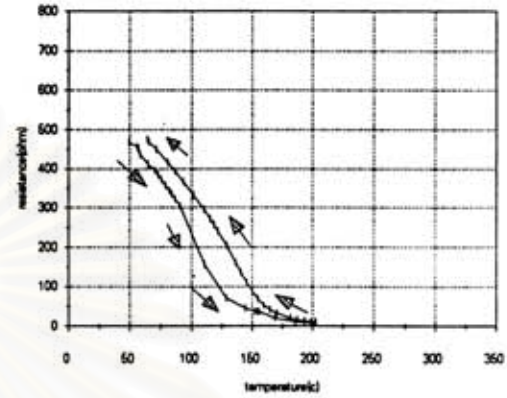


รูปที่ 4.7 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานขั้วสัมผัสตามอุณหภูมิ

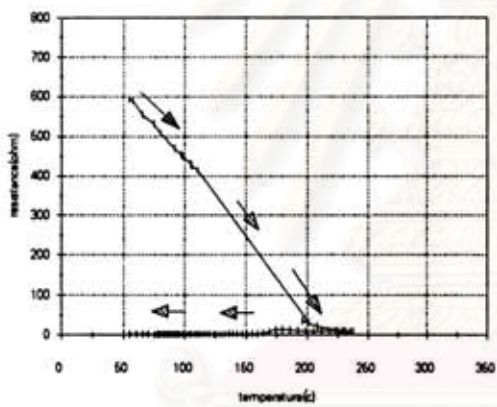
ทำการแอนนิลสารตัวอย่างทั้ง 4 ชั้นโดยกำหนดระดับอุณหภูมิแอนนิลของสารตัวอย่างแต่ละชั้นต่างๆ กันตั้งแต่ 150, 200, 250 และ 300 เซลเซียส ผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานขั้ว



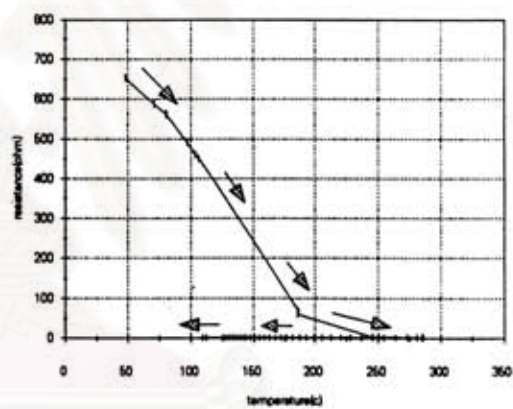
(a) อุณหภูมิ แอนนัล 150 °C



(b) อุณหภูมิ แอนนัล 200 °C



(c) อุณหภูมิ แอนนัล 250 °C



(d) อุณหภูมิ แอนนัล 300 °C

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานชั่วคราวตามอุณหภูมิ
เมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิแอนนัลต่างๆกัน

สภานิติบัญญัติ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัมพัทธ์ตามอุณหภูมิที่วัดได้จากสารตัวอย่างแต่ละชุดได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.8 a-d ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิแอนนีสต่ำกว่า 250 เซลเซียสความต้านทานของซั้วสัมพัทธ์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นความต้านทานซั้วสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิลง และกลับสู่ค่าความต้านทานเดิมในที่สุด เมื่อแอนนีสด้วยอุณหภูมิแอนนีสที่สูงตั้งแต่ 250 เซลเซียสขึ้นไปความต้านทานของซั้วสัมพัทธ์จะลดลงอย่างถาวรหลังจากที่อุณหภูมิลดลง ดังนั้นในการแอนนีสสารตัวอย่าง GaAs จึงเลือกใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 250 เซลเซียสขึ้นไป แต่ไม่ควรเกิน 350 เซลเซียสเนื่องจากอินเดียมจะเริ่มหลอมและเปลี่ยนสภาพ นอกจากนี้การแอนนีสสารตัวอย่าง GaAs สามารถลดความต้านทานของรอยต่อของซั้วสัมพัทธ์ได้ต่ำกว่ากว่า 1 โอห์ม ทำให้ไม่มีผลกระทบต่อการวัด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

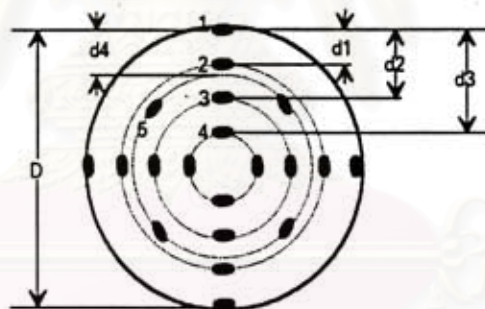
การศึกษาความคลาดเคลื่อนจากการวัดเมื่อข้อสัมผัสไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทางทฤษฎี

เมื่อข้อสัมผัสสารตัวอย่างไม่เป็นดังเงื่อนไขของวานเดอร์พาว การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนในบางกรณีเราสามารถคำนวณได้ เช่น กรณีที่ข้อสัมผัสอยู่ห่างจากเส้นขอบ ซึ่งคำนวณได้ด้วยสมการจากตารางที่ 2.2 คือ

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \cong -\frac{d^2}{2\ln D^2} \quad (4.5)$$

และ
$$\frac{\Delta\mu}{\mu} \cong -\frac{2d}{\ln D} \quad (4.6)$$

เพื่อยืนยันว่าระบบวัดนี้สามารถใช้ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสารได้ จึงทำการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaAs ที่มีความคลาดเคลื่อนที่ในกรณีดังกล่าว โดยตัดแผ่นเวเฟอร์ให้เป็นแผ่นกลม และวางจุดขั้วไฟฟ้าลงบนบริเวณที่ห่างจากขอบระยะต่างๆ (d_1-d_4) จำนวน 5 จุด ดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 แนวการวางจุดขั้วไฟฟ้าลงบนสารตัวอย่าง GaAs

ผลการวัดจากตารางที่ 4.2 a-b คือชุดของสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ที่วัดโดยวิธีวานเดอร์พาวจากข้อสัมผัสทั้ง 5 จุดบนสารตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยจากผลการวัดดังกล่าวได้นำมาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ($\frac{\Delta\rho}{\rho}_{(meas)}$, $\frac{\Delta\mu}{\mu}_{(meas)}$) และแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยแสดงเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ 4.5 และ 4.6

($\frac{\Delta\rho}{\rho}_{(cal)}$, $\frac{\Delta\mu}{\mu}_{(cal)}$) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของสภาพต้านทาน ($\frac{\Delta\rho}{\rho}_{(meas)}$) กับระยะห่างจากขอบของจุดขั้วไฟฟ้า (d) จากกราฟรูปที่ 4.10a เป็นเส้นตรงซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณจากสมการ 4.5 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ($\frac{\Delta\mu}{\mu}_{(meas)}$) กับค่ากำลังสองของระยะ d จากรูปที่ 4.10b



| จำนวนวัด | สภาพต้านทานไฟฟ้า (ohm-cm) | | | | | | | |
|----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | p12 | p24 | p35 | p46 | p57 | p68 | p71 | p82 |
| 1 | 1.03E-03 | 1.07E-03 | 1.02E-03 | 1.08E-03 | 1.06E-03 | 7.00E-03 | 1.06E-03 | 1.06E-03 |
| 2 | 9.80E-04 | 1.01E-03 | 9.70E-04 | 1.02E-04 | 1.00E-03 | 1.01E-03 | 1.01E-03 | 1.01E-03 |
| 3 | 7.80E-04 | 8.00E-04 | 7.60E-04 | 8.10E-04 | 7.90E-04 | 8.00E-04 | 8.00E-04 | 7.90E-04 |
| 4 | 4.90E-04 | 5.00E-04 | 4.80E-04 | 5.10E-04 | 5.10E-04 | 5.00E-04 | 5.30E-04 | 4.90E-04 |
| 5 | 9.20E-04 | 8.86E-04 | 8.96E-04 | 8.84E-04 | 8.49E-04 | 8.98E-04 | 8.54E-04 | 9.00E-04 |

(a)

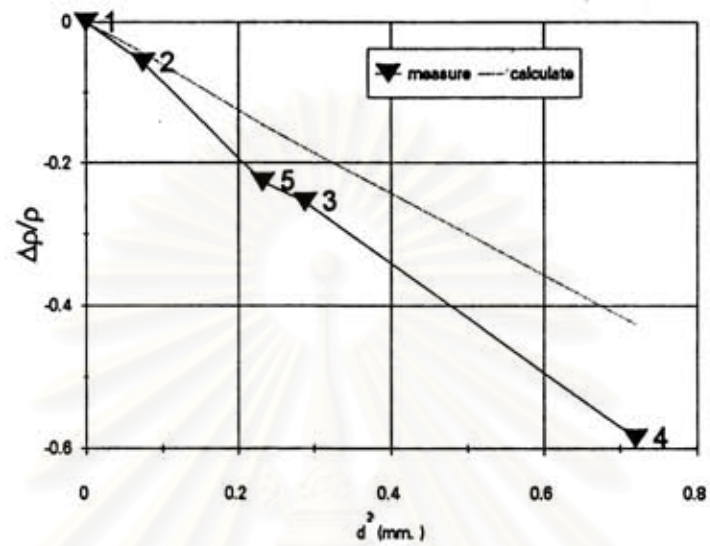
| จำนวนวัด | สภาพเคลื่อนที่ได้ของแอมป์ (cm ² /Vs) | | | | | | | |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | μ12 | μ24 | μ35 | μ46 | μ57 | μ68 | μ71 | μ82 |
| 1 | 1.49E+03 | 1.53E+03 | 1.49E+03 | 1.49E+03 | 1.51E+03 | 1.48E+03 | 1.51E+03 | 1.50E+03 |
| 2 | 1.02E+03 | 1.12E+03 | 1.08E+03 | 1.09E+03 | 1.06E+03 | 1.17E+03 | 1.20E+03 | 1.12E+03 |
| 3 | 6.42E+02 | 7.16E+02 | 6.91E+02 | 7.03E+02 | 6.74E+02 | 7.19E+02 | 7.12E+02 | 7.16E+02 |
| 4 | 1.54E+02 | 2.51E+02 | 2.77E+02 | 2.77E+02 | 2.38E+02 | 2.71E+02 | 2.64E+02 | 2.45E+02 |
| 5 | 1.05E+03 | 9.24E+02 | 8.96E+02 | 8.99E+02 | 9.57E+02 | 9.04E+02 | 9.04E+02 | 9.20E+02 |

(b)

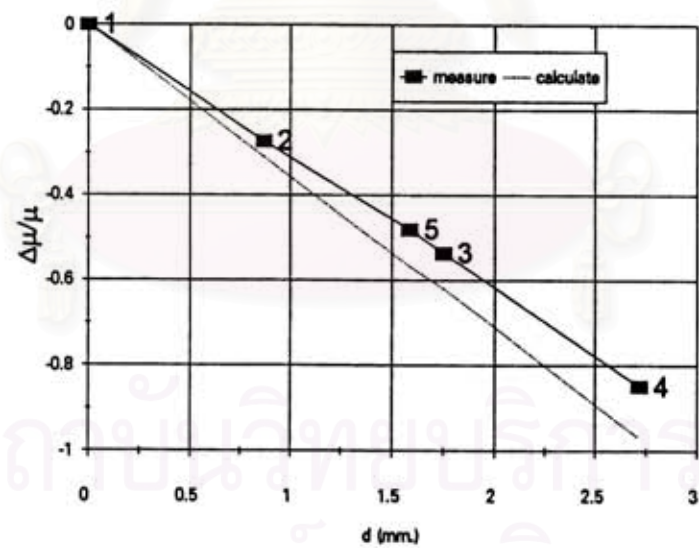
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลจากกราฟวัดสภาพต้านทานและสภาพเคลื่อนที่ไฟฟ้าจากขั้วสัมผัสจุดต่างๆบนสารตัวอย่าง GaAs แผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง .28 นิ้ว

| จำนวนวัด | ρ | Δρ/ρ | μ | Δμ/μ | d | Δρ/ρ | Δμ/μ |
|----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | (average) | (measure) | (average) | (measure) | (average) | (calculate) | (calculate) |
| 1 | 1.06E-03 | 0.00E+00 | 1.50E+03 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 1.00E-03 | -5.66E-02 | 1.09E+03 | -0.27260638 | 0.87 | -0.04 | -0.31 |
| 5 | 8.20E-04 | -2.26E-01 | 7.80E+02 | -0.48138298 | 1.59 | -0.15 | -0.57 |
| 3 | 7.90E-04 | -2.55E-01 | 6.97E+02 | -0.53656915 | 1.75 | -0.18 | -0.62 |
| 4 | 4.40E-04 | -5.85E-01 | 2.28E+02 | -0.84840426 | 2.72 | -0.43 | -0.97 |

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้จากขั้วสัมผัสจุดต่างๆ



(a)



(b)

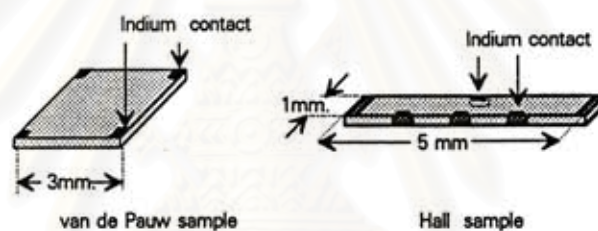
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนจากการวัด สภาพต้านทาน(a) และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (b) กับระยะห่างจากเส้นรอบ(d)

จะเป็นเส้นตรงสอดคล้องกับสมการ 4.6 เช่นเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวทำให้แน่ใจได้ว่า ระบบวัดนี้สามารถทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีวานเดอร์พาวและให้ผลการวัดถูกต้องตามทฤษฎีของวานเดอร์พาว

การศึกษาผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของ GaAs โดยวิธีวานเดอร์พาวและฮอลล์บาร์

ในการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากทั้งสองวิธี โดยวัดสารตัวอย่าง GaAs ที่ตัดมาจากแผ่นเวเฟอร์ 5 แผ่น แต่ละแผ่นตัดให้ได้สารตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและแถบสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 3x3 และ 1 x 5 mm (รูปที่ 4.11) สารตัวอย่างที่ตัดได้จะผ่านกระบวนการล้างและประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าและแอนนีลตามวิธีที่กล่าวไว้ในตอนต้น หลังจากนั้นจึงติดตั้งในระบบวัดและวัดสารตัวอย่างทั้งสองแบบที่อุณหภูมิห้อง

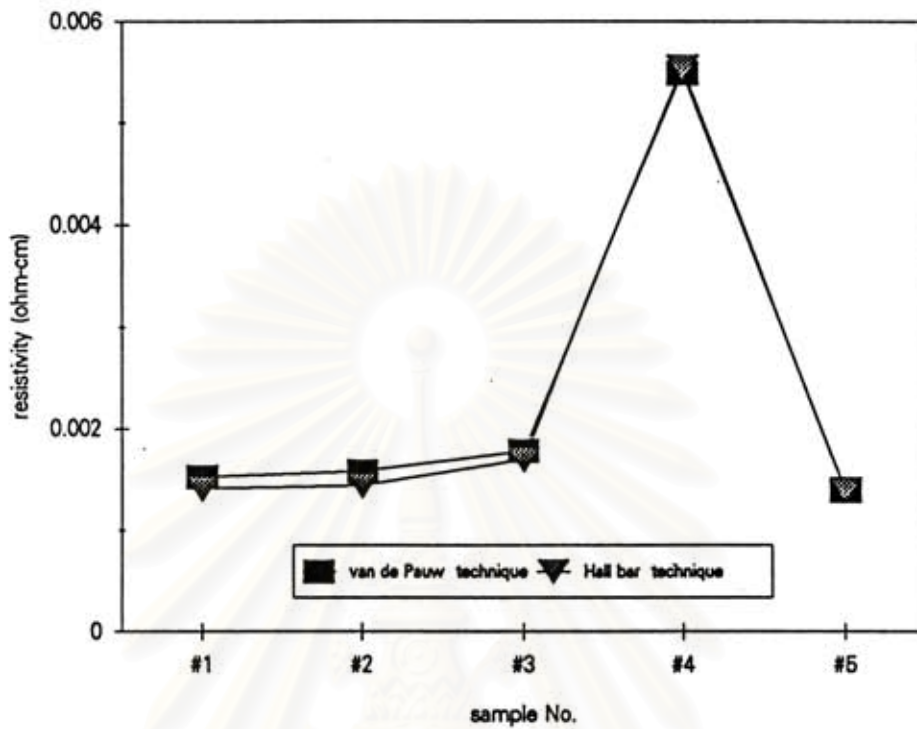


รูปที่ 4.11 รูปทรงของสารตัวอย่าง GaAs ทั้ง 5 ชุด

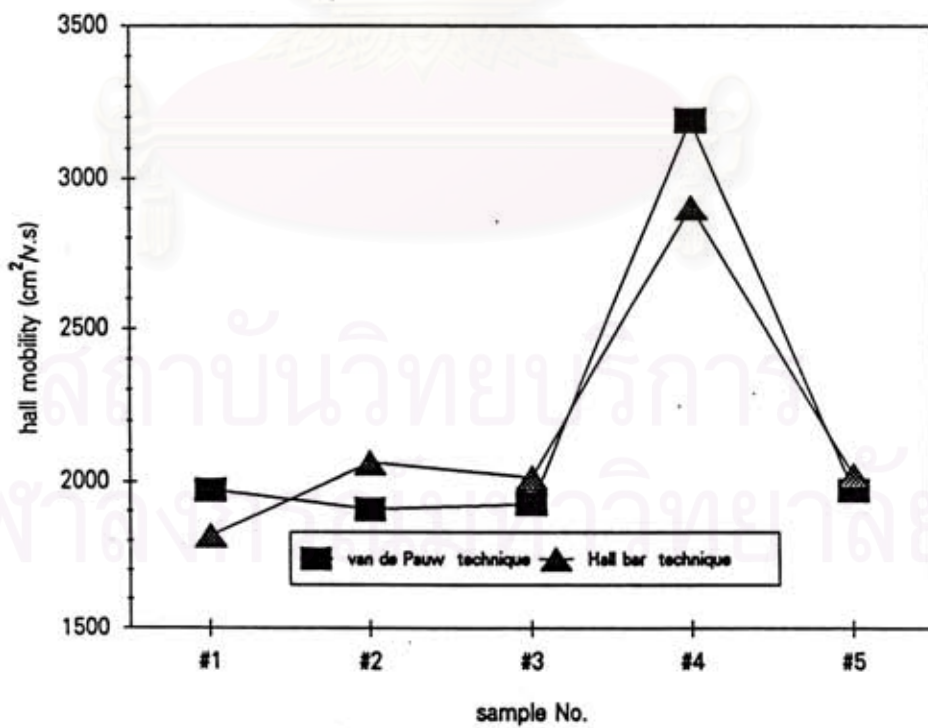
ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากสารตัวอย่างทั้ง 5 ชุด แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และ กราฟรูปที่ 4.12a-b ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบวัดนี้ให้ผลการวัดจากทั้งสองวิธีสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

| sample No. | van de Pauw technique | | | Hall bar technique | | |
|------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | ρ_{ohmic} | $\mu_{\text{cm}^2/\text{Vs}}$ | $n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ | ρ_{ohmic} | $\mu_{\text{cm}^2/\text{Vs}}$ | $n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ |
| #1 | 0.00153 | 1,970 | 2.1×10^{18} | 0.0014 | 1,817 | 2.4×10^{18} |
| #2 | 0.00153 | 1,905 | 2.1×10^{18} | 0.00143 | 2,061 | 2.1×10^{18} |
| #3 | 0.00178 | 1,923 | 1.8×10^{18} | 0.00169 | 2,010 | 1.8×10^{18} |
| #4 | 0.00549 | 3,191 | 3.6×10^{18} | 0.00555 | 2,904 | 3.9×10^{18} |
| #5 | 0.00138 | 1,936 | 2.3×10^{18} | 0.0014 | 2,020 | 2.2×10^{18} |

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลปรากฏการณ์ฮอลล์ที่วัดจากสารตัวอย่าง GaAs 5 ชุด



รูปที่ 4.12a เปรียบเทียบผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าจากวิธีวานเดอร์พาวและวิธีฮอลล์บาร์



รูปที่ 4.12b เปรียบเทียบผลการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้จากวิธีวานเดอร์พาวและวิธีฮอลล์บาร์

การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์จาก GaAs และ InSb ที่อุณหภูมิต่ำ

จากบทที่ 1 เราทราบว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญ ที่กำหนดปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือปนอยู่ โดยที่อุณหภูมิต่ำความเข้มข้นของพาหะอิสระจะเพิ่มตามอุณหภูมิ สำหรับช่วงอุณหภูมี่ปานกลางความหนาแน่นพาหะอิสระได้มาจากอะตอมของสิ่งเจือปนที่ถูกไอออไนซ์ทั้งหมดมีค่าคงที่และในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงๆ พาหะส่วนใหญ่เป็นของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกเอง และเพิ่มตามอุณหภูมิ ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับดังนี้

$$\text{ช่วงอุณหภูมิสูงๆ} \quad n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp(-E_g/2kT) \quad (4.7)$$

$$\text{ช่วงอุณหภูมี่ปานกลาง} \quad N_n = N_D - N_A \quad (4.8)$$

$$P_p = N_A - N_D$$

$$\text{ช่วงอุณหภูมิต่ำๆ} \quad n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_d N_c} \exp(-E_d/2kT) \quad (4.9)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{N_A N_v} \exp(-E_a/2kT)$$

ปริมาณพาหะอิสระเป็นตัวแปรกำหนดสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ในการทดลองนี้ได้ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสมบัติไฟฟ้าเหล่านี้โดยวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากสาร GaAs และ InSb ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ เราเลือกใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวทำความเย็น ซึ่งจะลดอุณหภูมิของชิ้นสารได้ต่ำสุดประมาณ 80 K สารตัวอย่างของ GaAs และ InSb ที่ตัดและผ่านการทำขั้วไฟฟ้าแล้วจะนำมาติดยึดกับแผ่นยึดสารที่ออกแบบสำหรับการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นทองแดงหนาประกบติดกับแผ่นปรินทอิพอกซีชนิดบาง แผ่นทองแดงมีหน้าที่นำความร้อนออกจากสารตัวอย่างซึ่งจะไปเสียบกับจุดติดสารภายในระบบวัด ชิ้นสารวางอยู่บนแผ่นทองแดงที่มีครีมนิลิโคินบางๆเคลือบอยู่และมีสายตัวนำไฟฟ้าเล็กๆ เชื่อมจากจุดขั้วไฟฟ้าไปยังจุดพักสายบนแผ่นยึดสาร

เมื่อพร้อมทำการวัด จะเริ่มลดอุณหภูมิสารตัวอย่างให้ต่ำที่สุดและทิ้งไว้ให้อุณหภูมิต่ำตัวประมาณ 10 - 15 นาที จึงเริ่มกระบวนการวัด ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพเคลื่อน

ที่ได้ของฮอลล์และความเข้มของพาหะของสารตัวอย่างทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 4.5-4.10

จากผลการวัดจาก GaAs สมบัติไฟฟ้าทั้ง 3 แบบคือ สภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ และความเข้มของพาหะอิสระคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความหนาแน่นพาหะอิสระซึ่งมีค่าประมาณ $2.06 \times 10^{19} - 2.09 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งถือว่าคงที่มากสำหรับช่วงอุณหภูมิที่ใช้ (110 - 300 K) แสดงให้เห็นว่าพาหะอิสระในช่วงอุณหภูมินี้เกิดมาจากการไอไอไนซ์ของอะตอมของสารเจือปน (si) ทั้งหมดหรือเป็นช่วงอิมิตัวของพาหะ

เมื่อพิจารณามผลการวัดของ InSb จะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 86 - 130 K ความหนาแน่นพาหะมีค่าคงที่หรือเป็นช่วงอิมิตัวของพาหะและความหนาแน่นพาหะจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 180 K ขึ้นไป แสดงว่าพาหะในช่วงอุณหภูมินี้ ไอไอไนซ์มาจากอะตอมของ InSb เองซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอินทรินสิก จากกราฟรูปที่ 4.18 เราสามารถฟิตข้อมูลจากทั้งสองช่วงอุณหภูมิด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแยกเป็นสองส่วน สำหรับส่วนอินทรินสิกฟิตได้ด้วยสมการ 4.7 โดยเปลี่ยนรูปใหม่ให้เป็น

$$\text{fitting1: } n_i = cT^{3/4} \exp\left(\frac{-E_g}{2.76 \times 10^{-23} T}\right) \quad (4.10)$$

จากการฟิตจะได้ $C = 4.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{4/3}$ และ $E_g = 0.245 \text{ eV}$ สำหรับค่า E_g ของ InSb ที่มีการรายงานโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.17 - 0.23 eV ที่อุณหภูมิ 300 - 0K [15] ซึ่งค่าที่ได้จากการฟิตจะใกล้เคียงกับช่วงดังกล่าวมาก

การฟิตกราฟในช่วงอิมิตัวจะได้สมการเส้นตรง

$$\text{fitting2: } n = 2.802 \times 10^{10} T + 1.72 \times 10^{14} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (4.11)$$

การเปลี่ยนแปลงความเข้มพาหะตามอุณหภูมิในช่วงอิมิตัวนี้มีน้อยมากจนถึงได้ว่าคงที่หรือมีค่าประมาณ $1.72 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าจากตารางที่ 4.8 และ กราฟรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงในรูปของสภาพต้านทานย่อยที่วัดได้ด้วยวิธีวานเดอร์พาวทุกรูปแบบดังกล่าวในบทที่ผ่านมา พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างชัดเจนเช่นเดียวกับที่แสดงออกกับพาหะอิสระ โดยจะมีค่าสูงสุดอยู่ตรงช่วงอุณหภูมิที่กราฟของพาหะอิสระเริ่มเข้าสู่ช่วงอินทรินสิก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ ในช่วงปลายของกราฟสภาพต้านทาน

ไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากลุ่มของสภาพต้านทานไฟฟ้าย่อยทั้ง 8 ค่ามีการกระจายค่าค่อนข้างมากกว่าในช่วงอุณหภูมิอื่นๆ ลักษณะเช่นนี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิช่วงนี้ค่อนข้างต่ำมากจนใกล้เคียงกับ 77 K ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิช่วงนี้ทำได้ยากมาก ทำให้ในขณะที่ทำการวัดอุณหภูมิของแต่ละจุดบนชิ้นสารตัวอย่างมีค่าไม่เท่ากัน

สำหรับข้อมูลสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากรายที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.17 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ในช่วง 500000 ถึง 70000 $\text{cm}^2 / \text{V.s}$ และจากกราฟที่ 4.19 ได้แสดงความสัมพันธ์ของสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ μ_H และ $T^{-3/2}$ ซึ่งเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิ 100-300 K จากการพิเคราะห์พบว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยความสัมพันธ์

$$\mu_H = 3.9 \times 10^8 \cdot \frac{1}{T^{3/2}} \quad (\text{cm}^2 / \text{V.s.K}^{3/2}) \quad (4.12)$$

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้แสดงให้เห็นว่ากลไกการกระเจิงของพาหะอิสระเป็นผลเนื่องจาก deformation potential scattering [10] และจะเป็นกลไกหลักไปจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 K จึงเริ่มเปลี่ยนชนิดของการกระเจิง ซึ่งเราสามารถทราบได้หากทำการวัดโดยเปลี่ยนตัวทำความเย็นให้เป็นฮีเลียมเหลวแทนไนโตรเจนเหลว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

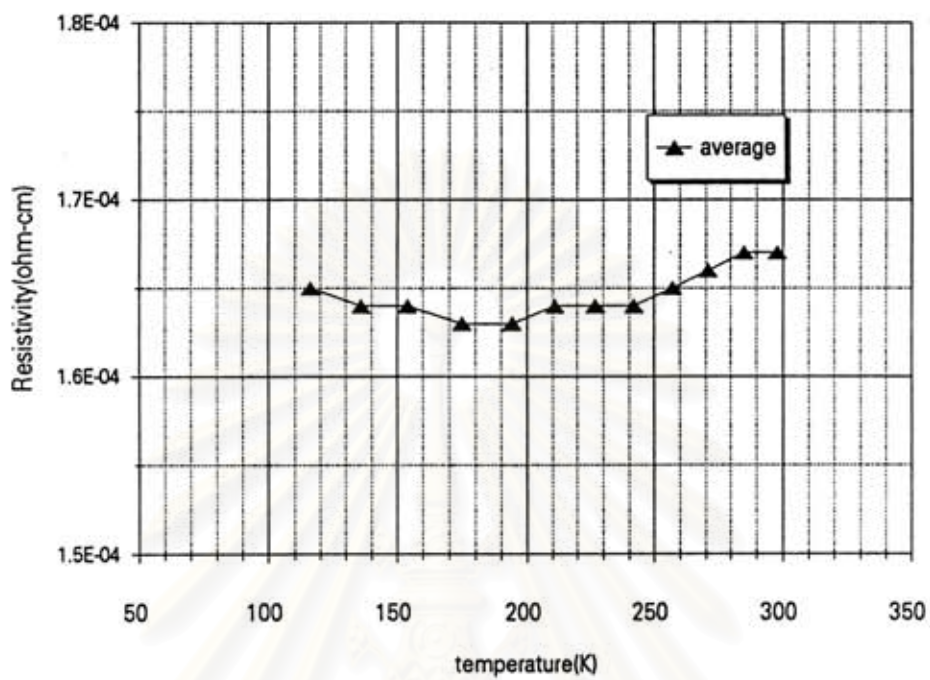
| อุณหภูมิ (K) | สภาพต้านทานไฟฟ้า(ohm-cm) | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | p 13 | p 24 | p 35 | p 46 | p 57 | p 68 | p 71 | p 82 | average |
| 298 | 1.65E-04 | 1.68E-04 | 1.64E-04 | 1.71E-04 | 1.72E-04 | 1.64E-04 | 1.73E-04 | 1.61E-04 | 1.67E-04 |
| 285 | 1.64E-04 | 1.67E-04 | 1.63E-04 | 1.70E-04 | 1.72E-04 | 1.62E-04 | 1.73E-04 | 1.60E-04 | 1.67E-04 |
| 271 | 1.63E-04 | 1.67E-04 | 1.62E-04 | 1.69E-04 | 1.71E-04 | 1.62E-04 | 1.72E-04 | 1.60E-04 | 1.66E-04 |
| 257 | 1.63E-04 | 1.66E-04 | 1.61E-04 | 1.68E-04 | 1.71E-04 | 1.60E-04 | 1.73E-04 | 1.57E-04 | 1.65E-04 |
| 242 | 1.63E-04 | 1.65E-04 | 1.62E-04 | 1.67E-04 | 1.70E-04 | 1.60E-04 | 1.71E-04 | 1.58E-04 | 1.64E-04 |
| 227 | 1.62E-04 | 1.65E-04 | 1.62E-04 | 1.66E-04 | 1.70E-04 | 1.60E-04 | 1.70E-04 | 1.58E-04 | 1.64E-04 |
| 211 | 1.61E-04 | 1.64E-04 | 1.61E-04 | 1.66E-04 | 1.69E-04 | 1.59E-04 | 1.70E-04 | 1.58E-04 | 1.64E-04 |
| 194 | 1.61E-04 | 1.65E-04 | 1.61E-04 | 1.65E-04 | 1.69E-04 | 1.58E-04 | 1.69E-04 | 1.58E-04 | 1.63E-04 |
| 175 | 1.61E-04 | 1.65E-04 | 1.61E-04 | 1.65E-04 | 1.71E-04 | 1.58E-04 | 1.70E-04 | 1.57E-04 | 1.63E-04 |
| 154 | 1.61E-04 | 1.65E-04 | 1.62E-04 | 1.65E-04 | 1.70E-04 | 1.58E-04 | 1.70E-04 | 1.58E-04 | 1.64E-04 |
| 136 | 1.62E-04 | 1.65E-04 | 1.62E-04 | 1.66E-04 | 1.71E-04 | 1.59E-04 | 1.70E-04 | 1.58E-04 | 1.64E-04 |
| 116 | 1.62E-04 | 1.66E-04 | 1.63E-04 | 1.66E-04 | 1.72E-04 | 1.59E-04 | 1.70E-04 | 1.60E-04 | 1.65E-04 |

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ

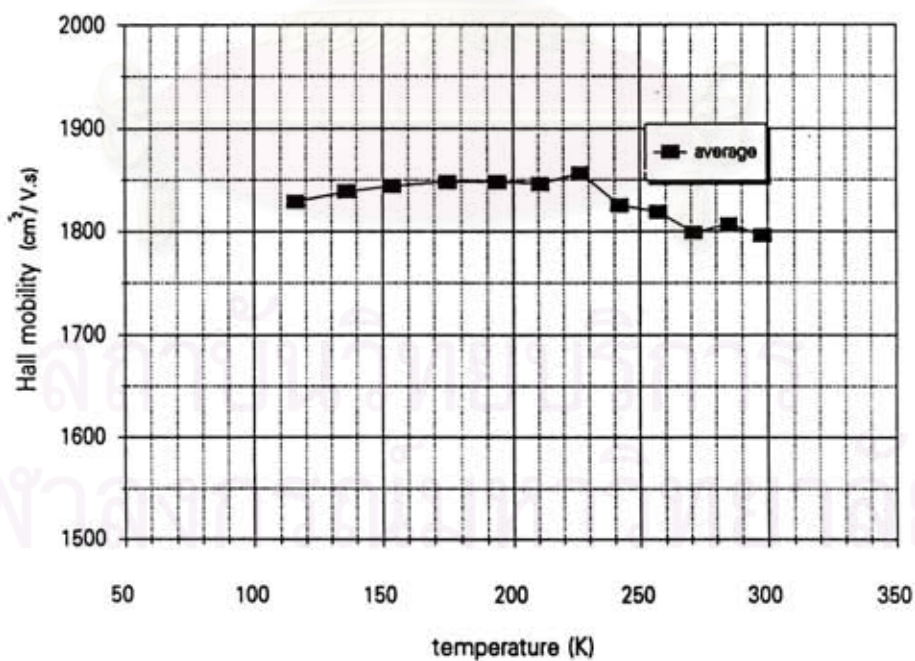
| อุณหภูมิ (K) | สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (cm ² /V.s) | | | | | | | | |
|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| | μ13 | μ24 | μ35 | μ46 | μ57 | μ68 | μ71 | μ82 | average |
| 298 | 1781 | 1812 | 1782 | 1810 | 1785 | 1807 | 1781 | 1812 | 1796 |
| 285 | 1782 | 1824 | 1795 | 1830 | 1786 | 1808 | 1801 | 1831 | 1807 |
| 271 | 1784 | 1809 | 1779 | 1812 | 1786 | 1821 | 1787 | 1813 | 1799 |
| 257 | 1797 | 1837 | 1804 | 1833 | 1807 | 1835 | 1807 | 1834 | 1819 |
| 242 | 1803 | 1839 | 1810 | 1841 | 1811 | 1838 | 1812 | 1843 | 1825 |
| 227 | 1827 | 1851 | 1819 | 1852 | 1822 | 1852 | 1822 | 1852 | 1856 |
| 211 | 1829 | 1860 | 1832 | 1853 | 1829 | 1863 | 1837 | 1865 | 1846 |
| 194 | 1828 | 1864 | 1835 | 1859 | 1830 | 1865 | 1838 | 1865 | 1848 |
| 175 | 1833 | 1858 | 1830 | 1859 | 1836 | 1859 | 1834 | 1863 | 1848 |
| 154 | 1829 | 1857 | 1829 | 1857 | 1827 | 1859 | 1833 | 1860 | 1844 |
| 136 | 1824 | 1850 | 1819 | 1853 | 1826 | 1854 | 1827 | 1855 | 1839 |
| 116 | 1812 | 1840 | 1815 | 1845 | 1810 | 1845 | 1820 | 1848 | 1829 |

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



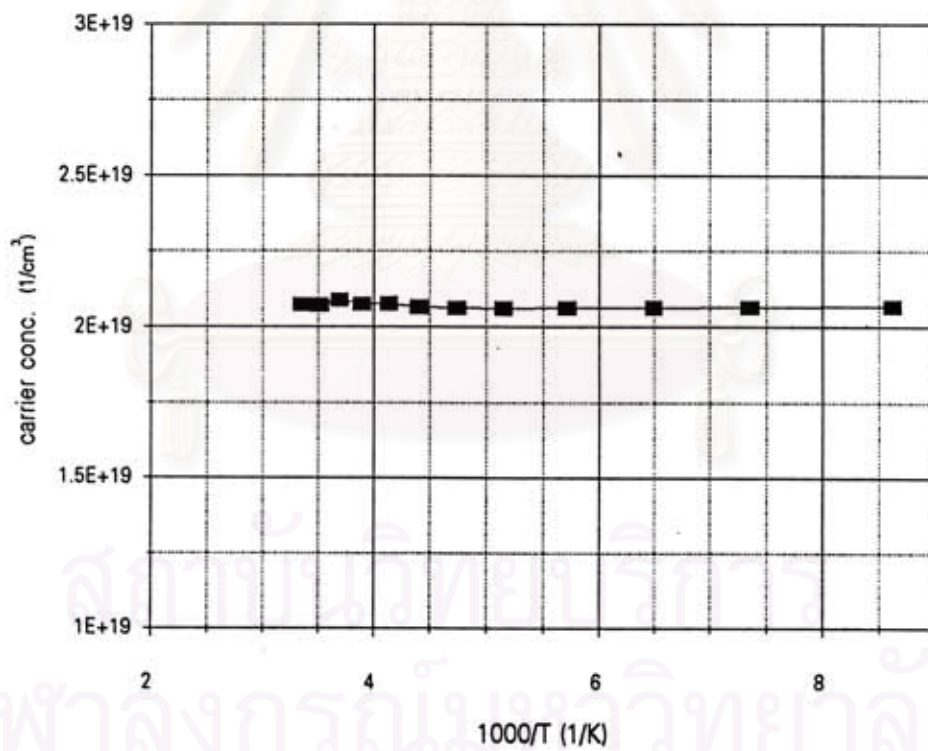
รูปที่ 4.13: ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าของ GaAs และอุณหภูมิ



รูปที่ 4.14: ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของ GaAs และอุณหภูมิ

| อุณหภูมิ (K) | 1000/T (1/K) | n (1/cm ³) |
|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 298 | 3.36 | 2.073E+19 |
| 285 | 3.51 | 2.072E+19 |
| 271 | 3.69 | 2.089E+19 |
| 257 | 3.89 | 2.075E+19 |
| 242 | 4.13 | 2.076E+19 |
| 227 | 4.41 | 2.066E+19 |
| 211 | 4.74 | 2.062E+19 |
| 194 | 5.15 | 2.061E+19 |
| 175 | 5.71 | 2.063E+19 |
| 154 | 6.49 | 2.064E+19 |
| 136 | 7.35 | 2.065E+19 |
| 116 | 8.62 | 2.067E+19 |

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลความหนาแน่นพาหะของสารตัวอย่าง GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ



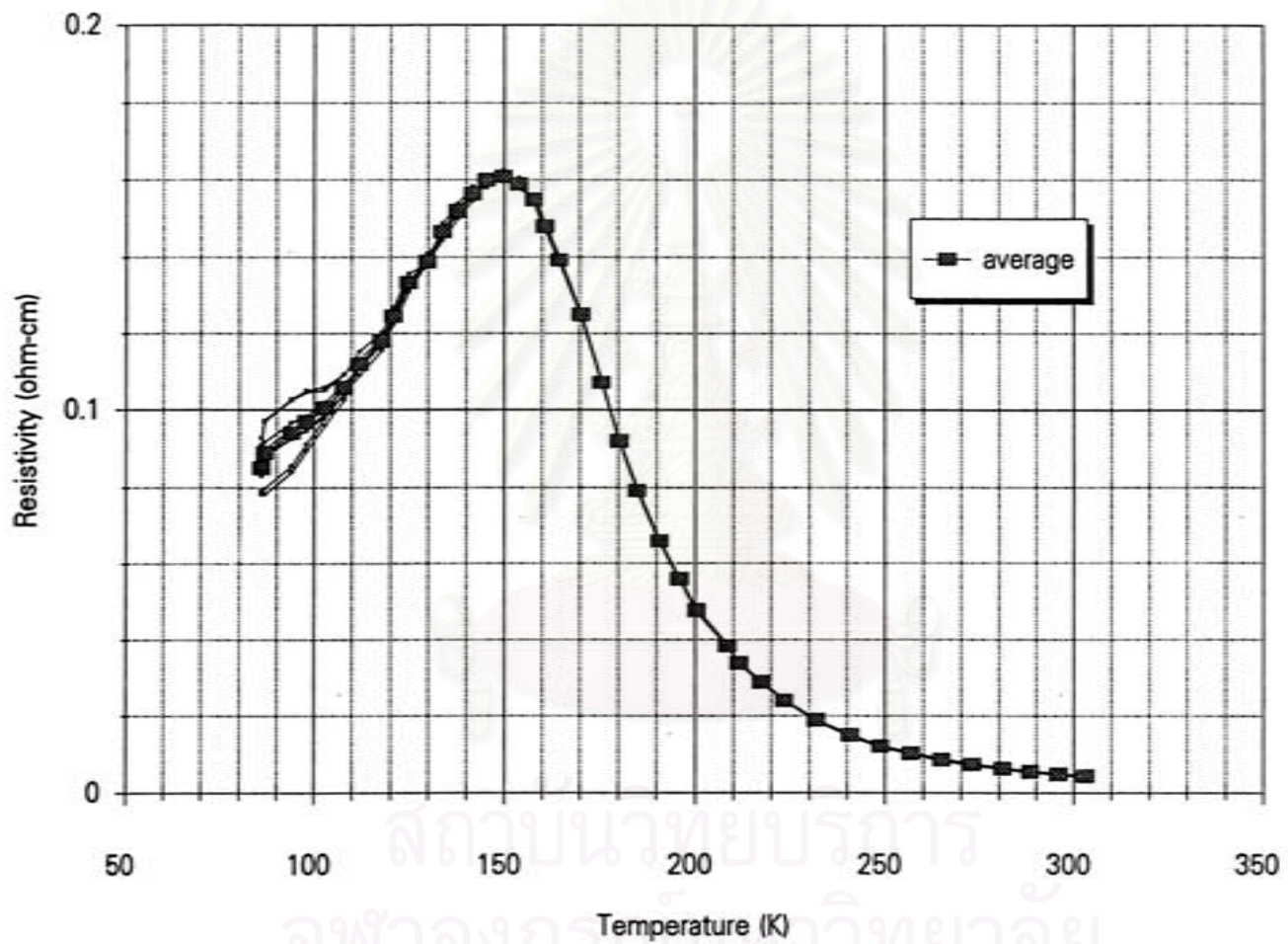
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะของ GaAs และอุณหภูมิ

| อุณหภูมิ (K) | สภาพต้านทานไฟฟ้า (ohm-cm) | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| | ρ_{13} | ρ_{24} | ρ_{35} | ρ_{46} | ρ_{57} | ρ_{68} | ρ_{71} | ρ_{82} | average |
| 86.0 | 0.0830 | 0.0854 | 0.0847 | 0.0862 | 0.0927 | 0.0790 | 0.0908 | 0.0782 | 0.0850 |
| 87.0 | 0.0882 | 0.0916 | 0.0879 | 0.0898 | 0.0968 | 0.0782 | 0.0972 | 0.0798 | 0.0887 |
| 94.0 | 0.0928 | 0.0967 | 0.0924 | 0.0950 | 0.1025 | 0.0840 | 0.1028 | 0.0855 | 0.0940 |
| 98.0 | 0.0949 | 0.0984 | 0.0943 | 0.0966 | 0.1044 | 0.0894 | 0.1051 | 0.0911 | 0.0968 |
| 103.0 | 0.0990 | 0.1019 | 0.0982 | 0.1001 | 0.1051 | 0.0960 | 0.1059 | 0.0978 | 0.1005 |
| 108.0 | 0.1042 | 0.1070 | 0.1039 | 0.1054 | 0.1091 | 0.1025 | 0.1093 | 0.1041 | 0.1057 |
| 112.0 | 0.1089 | 0.1114 | 0.1108 | 0.1117 | 0.1153 | 0.1120 | 0.1134 | 0.1116 | 0.1119 |
| 118.0 | 0.1155 | 0.1177 | 0.1171 | 0.1178 | 0.1204 | 0.1185 | 0.1187 | 0.1183 | 0.1180 |
| 121.0 | 0.1224 | 0.1242 | 0.1238 | 0.1243 | 0.1267 | 0.1250 | 0.1253 | 0.1249 | 0.1246 |
| 125.0 | 0.1307 | 0.1326 | 0.1325 | 0.1332 | 0.1357 | 0.1344 | 0.1339 | 0.1337 | 0.1333 |
| 130.0 | 0.1385 | 0.1409 | 0.1381 | 0.1390 | 0.1386 | 0.1371 | 0.1391 | 0.1390 | 0.1388 |
| 134.0 | 0.1444 | 0.1459 | 0.1459 | 0.1465 | 0.1488 | 0.1474 | 0.1472 | 0.1468 | 0.1466 |
| 138.0 | 0.1499 | 0.1513 | 0.1514 | 0.1518 | 0.1540 | 0.1526 | 0.1526 | 0.1521 | 0.1520 |
| 142.0 | 0.1545 | 0.1554 | 0.1557 | 0.1562 | 0.1583 | 0.1571 | 0.1570 | 0.1563 | 0.1563 |
| 145.5 | 0.1599 | 0.1612 | 0.1589 | 0.1597 | 0.1581 | 0.1579 | 0.1591 | 0.1594 | 0.1599 |
| 150.0 | 0.1594 | 0.1599 | 0.1605 | 0.1610 | 0.1626 | 0.1619 | 0.1614 | 0.1608 | 0.1609 |
| 154.0 | 0.1598 | 0.1606 | 0.1587 | 0.1594 | 0.1577 | 0.1576 | 0.1588 | 0.1589 | 0.1590 |
| 158.0 | 0.1539 | 0.1542 | 0.1546 | 0.1548 | 0.1560 | 0.1554 | 0.1553 | 0.1547 | 0.1549 |
| 161.0 | 0.1467 | 0.1473 | 0.1478 | 0.1482 | 0.1493 | 0.1487 | 0.1481 | 0.1479 | 0.1480 |
| 164.7 | 0.1384 | 0.1387 | 0.1389 | 0.1390 | 0.1404 | 0.1391 | 0.1399 | 0.1388 | 0.1392 |
| 170.5 | 0.1242 | 0.1247 | 0.1249 | 0.1251 | 0.1258 | 0.1253 | 0.1251 | 0.1249 | 0.1250 |
| 175.7 | 0.1066 | 0.1071 | 0.1069 | 0.1073 | 0.1078 | 0.1072 | 0.1075 | 0.1069 | 0.1071 |
| 180.5 | 0.0916 | 0.0919 | 0.0917 | 0.0920 | 0.0923 | 0.0915 | 0.0922 | 0.0914 | 0.0918 |
| 185.0 | 0.0786 | 0.0792 | 0.0789 | 0.0794 | 0.0798 | 0.0788 | 0.0796 | 0.0786 | 0.0791 |
| 191.0 | 0.0655 | 0.0660 | 0.0656 | 0.0661 | 0.0666 | 0.0655 | 0.0665 | 0.0654 | 0.0659 |
| 196.0 | 0.0554 | 0.0561 | 0.0556 | 0.0561 | 0.0564 | 0.0556 | 0.0561 | 0.0555 | 0.0559 |
| 200.5 | 0.0472 | 0.0479 | 0.0474 | 0.0479 | 0.0482 | 0.0471 | 0.0480 | 0.0471 | 0.0476 |
| 208.5 | 0.0380 | 0.0387 | 0.0381 | 0.0386 | 0.0387 | 0.0379 | 0.0386 | 0.0381 | 0.0383 |
| 211.5 | 0.0335 | 0.0342 | 0.0337 | 0.0342 | 0.0341 | 0.0335 | 0.0339 | 0.0335 | 0.0338 |
| 217.5 | 0.0286 | 0.0291 | 0.0286 | 0.0291 | 0.0292 | 0.0285 | 0.0291 | 0.0285 | 0.0288 |
| 223.5 | 0.0238 | 0.0242 | 0.0238 | 0.0243 | 0.0243 | 0.0238 | 0.0243 | 0.0237 | 0.0240 |
| 232.0 | 0.0185 | 0.0192 | 0.0187 | 0.0192 | 0.0192 | 0.0187 | 0.0191 | 0.0186 | 0.0189 |
| 241.0 | 0.0147 | 0.0152 | 0.0148 | 0.0153 | 0.0153 | 0.0148 | 0.0152 | 0.0147 | 0.0150 |
| 249.0 | 0.0118 | 0.0124 | 0.0119 | 0.0124 | 0.0125 | 0.0118 | 0.0125 | 0.0118 | 0.0121 |
| 257.0 | 0.0100 | 0.0104 | 0.0100 | 0.0106 | 0.0105 | 0.0100 | 0.0105 | 0.0099 | 0.0103 |
| 265.0 | 0.0083 | 0.0089 | 0.0084 | 0.0089 | 0.0090 | 0.0085 | 0.0089 | 0.0084 | 0.0087 |
| 273.0 | 0.0071 | 0.0074 | 0.0071 | 0.0075 | 0.0078 | 0.0070 | 0.0078 | 0.0069 | 0.0073 |
| 281.0 | 0.0061 | 0.0065 | 0.0062 | 0.0065 | 0.0067 | 0.0061 | 0.0066 | 0.0061 | 0.0063 |
| 288.5 | 0.0052 | 0.0056 | 0.0054 | 0.0056 | 0.0057 | 0.0053 | 0.0056 | 0.0054 | 0.0055 |
| 296.0 | 0.0046 | 0.0050 | 0.0047 | 0.0050 | 0.0052 | 0.0046 | 0.0051 | 0.0046 | 0.0049 |
| 303.0 | 0.0040 | 0.0045 | 0.0042 | 0.0044 | 0.0047 | 0.0041 | 0.0044 | 0.0041 | 0.0043 |

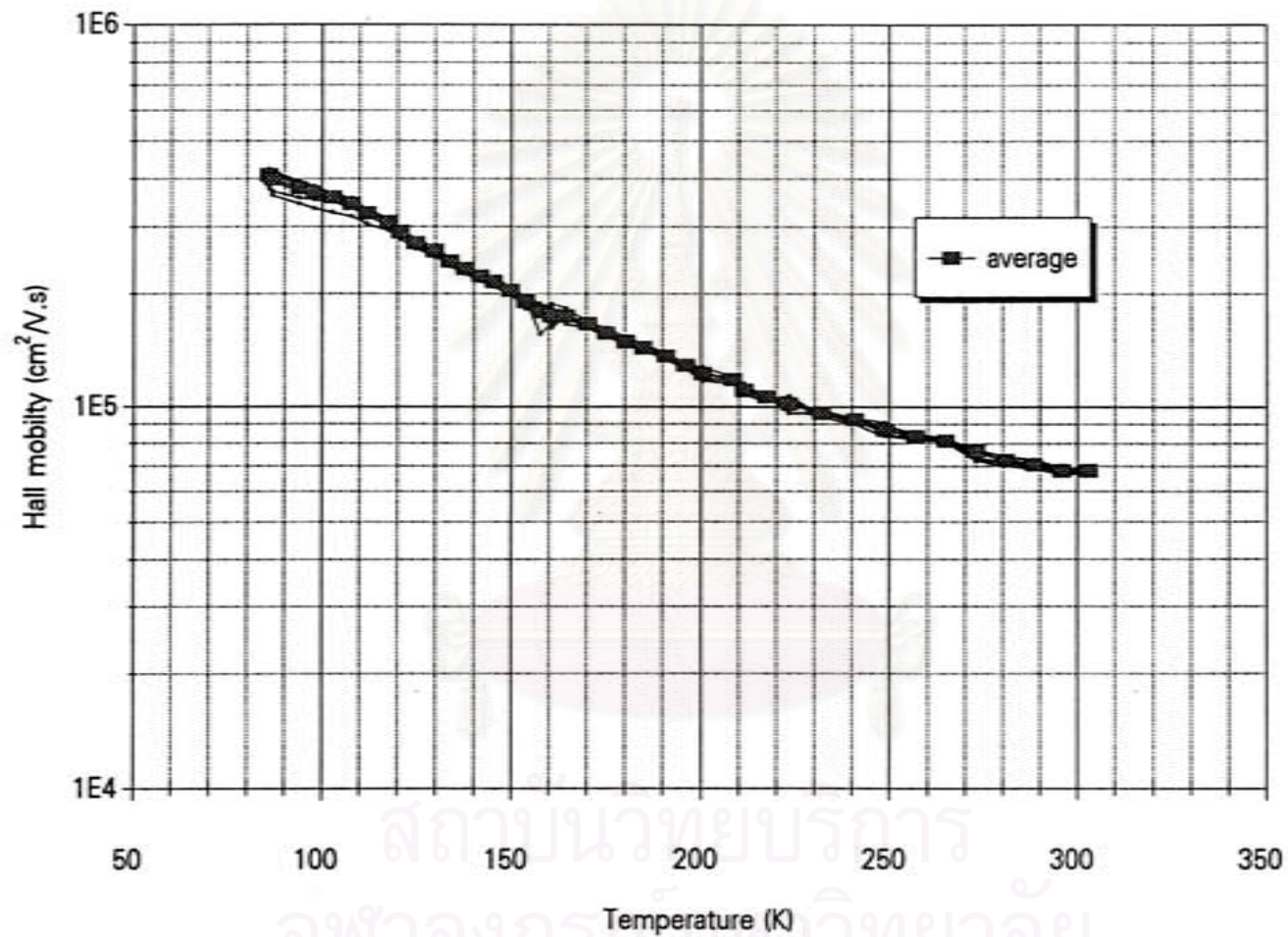
ตารางที่ 4.8 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ

| อุณหภูมิ (K) | สภาพเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (cm ² /Vs) | | | | | | | | |
|-----------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | μ13 | μ24 | μ35 | μ46 | μ57 | μ68 | μ71 | μ82 | average |
| 86.0 | 4.24E+05 | 4.21E+05 | 3.96E+05 | 3.81E+05 | 3.75E+05 | 4.23E+05 | 4.14E+05 | 4.22E+05 | 4.07E+05 |
| 87.0 | 4.17E+05 | 4.12E+05 | 3.90E+05 | 3.70E+05 | 3.61E+05 | 4.14E+05 | 4.06E+05 | 4.11E+05 | 3.97E+05 |
| 94.0 | 3.95E+05 | 3.90E+05 | 3.71E+05 | 3.55E+05 | 3.43E+05 | 3.92E+05 | 3.84E+05 | 3.90E+05 | 3.77E+05 |
| 98.0 | 3.81E+05 | 3.76E+05 | 3.61E+05 | 3.51E+05 | 3.33E+05 | 3.79E+05 | 3.74E+05 | 3.80E+05 | 3.67E+05 |
| 103.0 | 3.67E+05 | 3.64E+05 | 3.49E+05 | 3.47E+05 | 3.26E+05 | 3.64E+05 | 3.62E+05 | 3.67E+05 | 3.56E+05 |
| 108.0 | 3.55E+05 | 3.51E+05 | 3.37E+05 | 3.33E+05 | 3.18E+05 | 3.51E+05 | 3.46E+05 | 3.53E+05 | 3.43E+05 |
| 112.0 | 3.31E+05 | 3.31E+05 | 3.17E+05 | 3.18E+05 | 3.04E+05 | 3.29E+05 | 3.26E+05 | 3.33E+05 | 3.24E+05 |
| 118.0 | 3.14E+05 | 3.13E+05 | 3.00E+05 | 3.02E+05 | 2.91E+05 | 3.11E+05 | 3.07E+05 | 3.14E+05 | 3.07E+05 |
| 121.0 | 2.94E+05 | 2.97E+05 | 2.83E+05 | 2.87E+05 | 2.77E+05 | 2.92E+05 | 2.91E+05 | 2.96E+05 | 2.90E+05 |
| 125.0 | 2.74E+05 | 2.78E+05 | 2.65E+05 | 2.69E+05 | 2.61E+05 | 2.74E+05 | 2.72E+05 | 2.78E+05 | 2.71E+05 |
| 130.0 | 2.62E+05 | 2.64E+05 | 2.52E+05 | 2.56E+05 | 2.49E+05 | 2.60E+05 | 2.60E+05 | 2.65E+05 | 2.58E+05 |
| 134.0 | 2.47E+05 | 2.48E+05 | 2.35E+05 | 2.40E+05 | 2.35E+05 | 2.44E+05 | 2.42E+05 | 2.48E+05 | 2.42E+05 |
| 138.0 | 2.36E+05 | 2.37E+05 | 2.25E+05 | 2.30E+05 | 2.24E+05 | 2.33E+05 | 2.32E+05 | 2.37E+05 | 2.32E+05 |
| 142.0 | 2.25E+05 | 2.27E+05 | 2.15E+05 | 2.19E+05 | 2.14E+05 | 2.23E+05 | 2.22E+05 | 2.27E+05 | 2.22E+05 |
| 145.5 | 2.17E+05 | 2.20E+05 | 2.08E+05 | 2.12E+05 | 2.08E+05 | 2.15E+05 | 2.15E+05 | 2.20E+05 | 2.14E+05 |
| 150.0 | 2.06E+05 | 2.09E+05 | 1.97E+05 | 2.02E+05 | 1.98E+05 | 2.03E+05 | 2.03E+05 | 2.07E+05 | 2.03E+05 |
| 154.0 | 1.96E+05 | 1.97E+05 | 1.85E+05 | 1.82E+05 | 1.88E+05 | 1.92E+05 | 1.89E+05 | 1.94E+05 | 1.90E+05 |
| 158.0 | 1.88E+05 | 1.86E+05 | 1.75E+05 | 1.76E+05 | 1.80E+05 | 1.84E+05 | 1.56E+05 | 1.83E+05 | 1.78E+05 |
| 161.0 | 1.84E+05 | 1.87E+05 | 1.62E+05 | 1.66E+05 | 1.77E+05 | 1.80E+05 | 1.67E+05 | 1.72E+05 | 1.74E+05 |
| 164.7 | 1.74E+05 | 1.82E+05 | 1.72E+05 | 1.74E+05 | 1.66E+05 | 1.70E+05 | 1.75E+05 | 1.80E+05 | 1.74E+05 |
| 170.5 | 1.68E+05 | 1.68E+05 | 1.62E+05 | 1.66E+05 | 1.62E+05 | 1.65E+05 | 1.66E+05 | 1.71E+05 | 1.66E+05 |
| 175.3 | 1.58E+05 | 1.62E+05 | 1.54E+05 | 1.55E+05 | 1.56E+05 | 1.58E+05 | 1.54E+05 | 1.59E+05 | 1.57E+05 |
| 180.5 | 1.49E+05 | 1.53E+05 | 1.46E+05 | 1.50E+05 | 1.46E+05 | 1.47E+05 | 1.50E+05 | 1.52E+05 | 1.49E+05 |
| 185.0 | 1.43E+05 | 1.48E+05 | 1.41E+05 | 1.41E+05 | 1.42E+05 | 1.45E+05 | 1.42E+05 | 1.46E+05 | 1.44E+05 |
| 191.0 | 1.37E+05 | 1.40E+05 | 1.33E+05 | 1.35E+05 | 1.35E+05 | 1.38E+05 | 1.34E+05 | 1.38E+05 | 1.36E+05 |
| 196.0 | 1.30E+05 | 1.31E+05 | 1.25E+05 | 1.28E+05 | 1.26E+05 | 1.29E+05 | 1.28E+05 | 1.32E+05 | 1.29E+05 |
| 200.5 | 1.23E+05 | 1.23E+05 | 1.17E+05 | 1.24E+05 | 1.19E+05 | 1.22E+05 | 1.25E+05 | 1.28E+05 | 1.23E+05 |
| 208.5 | 1.18E+05 | 1.20E+05 | 1.16E+05 | 1.17E+05 | 1.17E+05 | 1.18E+05 | 1.18E+05 | 1.20E+05 | 1.18E+05 |
| 211.5 | 1.13E+05 | 1.12E+05 | 1.07E+05 | 1.16E+05 | 1.09E+05 | 1.12E+05 | 1.07E+05 | 1.10E+05 | 1.11E+05 |
| 217.5 | 1.09E+05 | 1.08E+05 | 1.04E+05 | 1.03E+05 | 1.06E+05 | 1.09E+05 | 1.03E+05 | 1.06E+05 | 1.06E+05 |
| 223.5 | 1.01E+05 | 9.61E+04 | 1.03E+05 | 1.06E+05 | 9.59E+04 | 9.95E+04 | 1.05E+05 | 1.07E+05 | 1.02E+05 |
| 232.0 | 9.82E+04 | 9.74E+04 | 9.37E+04 | 9.48E+04 | 9.58E+04 | 9.83E+04 | 9.42E+04 | 9.58E+04 | 9.60E+04 |
| 241.0 | 9.29E+04 | 9.23E+04 | 8.95E+04 | 9.35E+04 | 9.08E+04 | 9.31E+04 | 9.25E+04 | 9.47E+04 | 9.24E+04 |
| 249.0 | 8.83E+04 | 8.65E+04 | 8.33E+04 | 9.09E+04 | 8.64E+04 | 8.90E+04 | 8.43E+04 | 8.41E+04 | 8.66E+04 |
| 257.0 | 8.46E+04 | 8.43E+04 | 8.20E+04 | 8.27E+04 | 8.32E+04 | 8.52E+04 | 8.18E+04 | 8.35E+04 | 8.34E+04 |
| 265.0 | 8.20E+04 | 8.19E+04 | 8.08E+04 | 8.07E+04 | 8.00E+04 | 8.28E+04 | 8.06E+04 | 8.14E+04 | 8.13E+04 |
| 273.0 | 7.69E+04 | 7.54E+04 | 7.28E+04 | 7.23E+04 | 7.54E+04 | 7.74E+04 | 7.17E+04 | 7.32E+04 | 7.64E+04 |
| 281.0 | 7.34E+04 | 7.29E+04 | 7.14E+04 | 7.14E+04 | 7.25E+04 | 7.42E+04 | 6.99E+04 | 7.19E+04 | 7.22E+04 |
| 288.5 | 7.18E+04 | 7.09E+04 | 6.95E+04 | 6.91E+04 | 7.07E+04 | 7.27E+04 | 6.85E+04 | 6.98E+04 | 7.04E+04 |
| 296.0 | 6.85E+04 | 6.84E+04 | 6.72E+04 | 6.77E+04 | 6.80E+04 | 6.94E+04 | 6.64E+04 | 6.75E+04 | 6.79E+04 |
| 303.0 | 6.84E+04 | 6.86E+04 | 6.74E+04 | 6.75E+04 | 6.77E+04 | 6.89E+04 | 6.65E+04 | 6.78E+04 | 6.79E+04 |

ตารางที่ 4.9 แสดงสภาพเคลื่อนที่ไดรอปของฮอลล์ของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าตามอุณหภูมิของ InSb



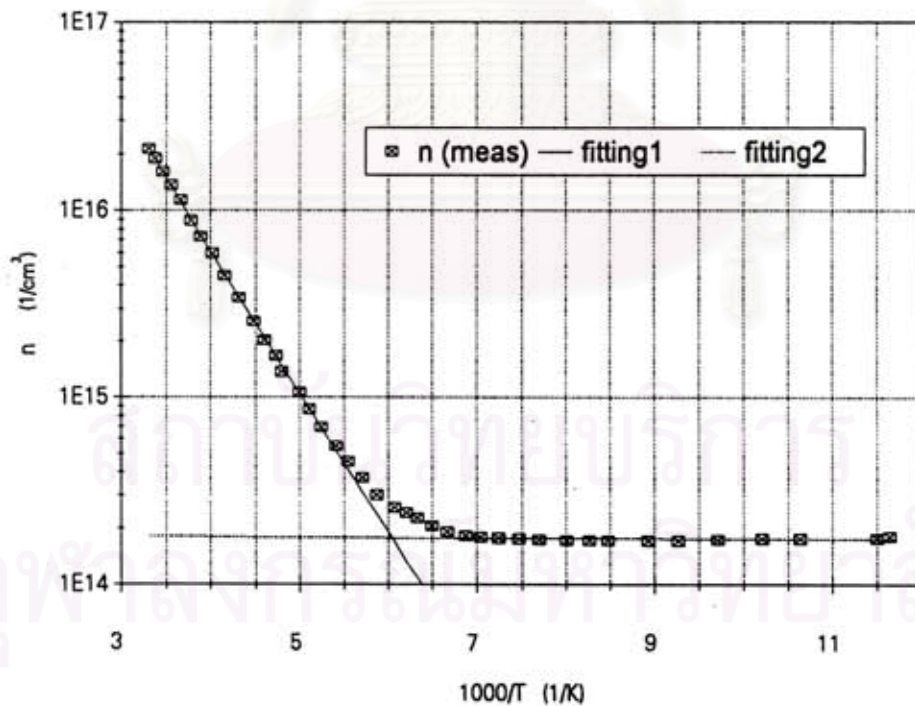
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนที่ได้ของ ฮอลล์ตามอุณหภูมิของ InSb



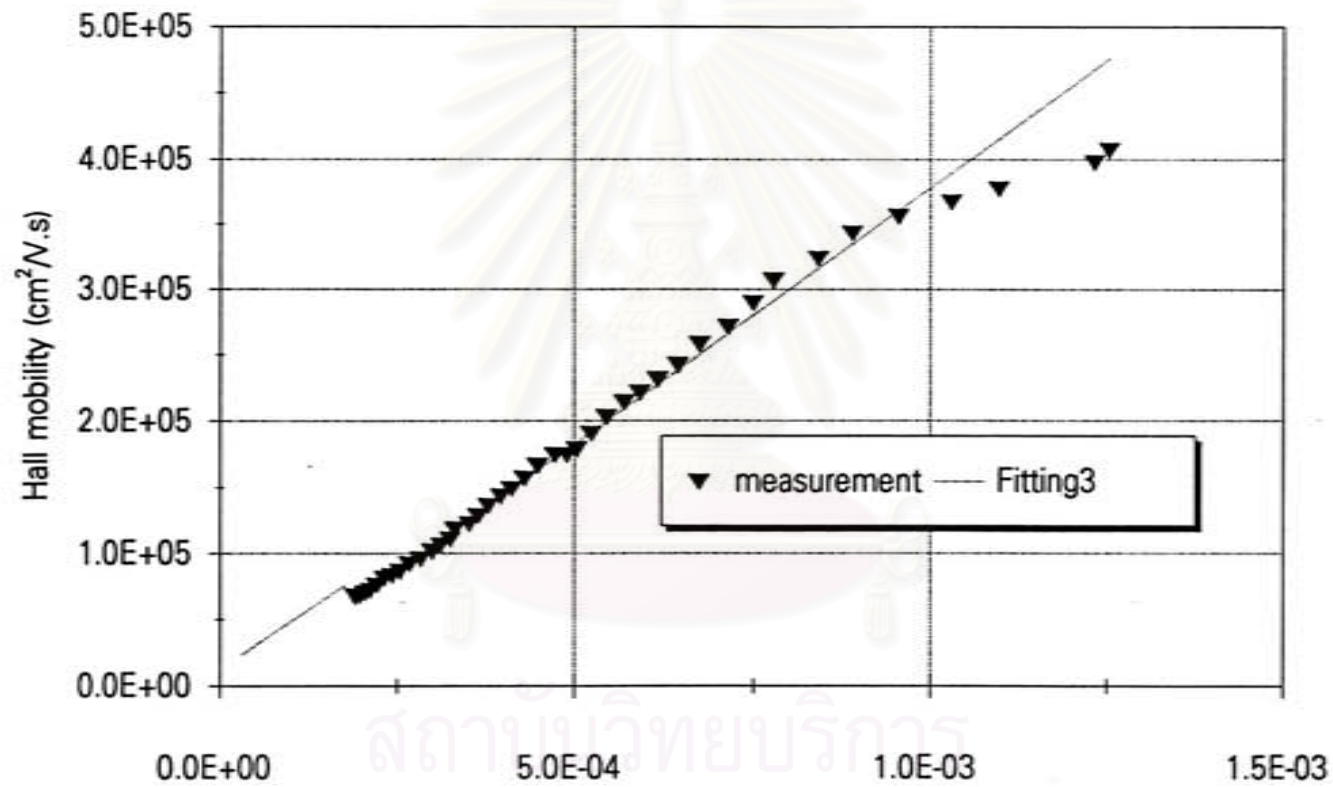
| อุณหภูมิ (K) | 1000/T (1/K) | ความหนาแน่นพาหะ (1/cm ³) |
|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 86.0 | 11.63 | 1.81E+14 |
| 87.0 | 11.49 | 1.77E+14 |
| 94.0 | 10.64 | 1.76E+14 |
| 98.0 | 10.20 | 1.76E+14 |
| 103.0 | 9.71 | 1.75E+14 |
| 108.0 | 9.26 | 1.72E+14 |
| 112.0 | 8.93 | 1.73E+14 |
| 118.0 | 8.47 | 1.73E+14 |
| 121.0 | 8.26 | 1.73E+14 |
| 125.0 | 8.00 | 1.73E+14 |
| 130.0 | 7.69 | 1.74E+14 |
| 134.0 | 7.46 | 1.76E+14 |
| 138.0 | 7.25 | 1.77E+14 |
| 142.0 | 7.04 | 1.80E+14 |
| 145.5 | 6.87 | 1.83E+14 |
| 150.0 | 6.67 | 1.91E+14 |
| 154.0 | 6.49 | 2.07E+14 |
| 158.0 | 6.33 | 2.26E+14 |
| 161.0 | 6.21 | 2.42E+14 |
| 164.7 | 6.07 | 2.58E+14 |
| 170.5 | 5.87 | 3.01E+14 |

| อุณหภูมิ (K) | 1000/T (1/K) | ความหนาแน่นพาหะ (1/cm ³) |
|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 175.3 | 5.70 | 3.72E+14 |
| 180.5 | 5.54 | 4.56E+14 |
| 185.0 | 5.41 | 5.50E+14 |
| 191.0 | 5.24 | 6.96E+14 |
| 196.0 | 5.10 | 8.67E+14 |
| 200.5 | 4.99 | 1.07E+15 |
| 208.5 | 4.80 | 1.38E+15 |
| 211.5 | 4.73 | 1.67E+15 |
| 217.5 | 4.60 | 2.03E+15 |
| 223.5 | 4.47 | 2.56E+15 |
| 232.0 | 4.31 | 3.44E+15 |
| 241.0 | 4.15 | 4.50E+15 |
| 249.0 | 4.02 | 5.94E+15 |
| 257.0 | 3.89 | 7.31E+15 |
| 265.0 | 3.77 | 8.87E+15 |
| 273.0 | 3.66 | 1.14E+16 |
| 281.0 | 3.56 | 1.37E+16 |
| 288.5 | 3.47 | 1.61E+16 |
| 296.0 | 3.38 | 1.90E+16 |
| 303.0 | 3.30 | 2.14E+16 |

ตารางที่ 4.10 แสดงความเข้มข้นพาหะอิสระของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ



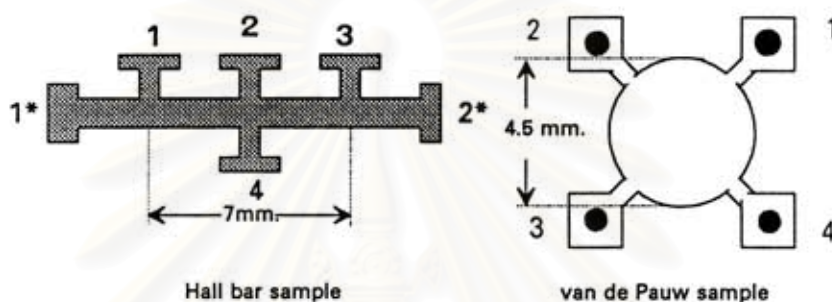
รูปที่ 4.18 กราฟความเข้มข้นพาหะอิสระของสารตัวอย่าง InSb ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μ_H และ $T^{3/2}$

การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์(CuInSe₂)

การทดลองนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ซึ่งมี CuInSe₂ เป็นชั้น P-type CuInSe₂ ที่นำมาทำการทดลองวัดสมบัติเป็นฟิล์มบางที่ได้รับการเตรียมให้มีความหนาประมาณ 2500 อังสตรอมและมีรูปทรงมาตรฐานดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 รูปทรงของฟิล์มบาง CuInSe₂ ที่เตรียมได้

เพื่อเป็นการตรวจสอบมาตรฐาน [16] ที่ว่าการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe₂ ลงบนฐานรอง (substrate) ที่มีอุณหภูมิสูงพอเหมาะจะได้ฟิล์มบางที่มีสมบัติไฟฟ้าตามที่ต้องการคือ เป็นฟิล์มบางชนิด P และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูง เราจึงศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นบนฐานรองกระจกสไลด์ที่มีอุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 250,300,350 และ 400 °c จำนวน 4 ชุด โดยฟิล์มบางที่ได้จะได้รับการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากวิธีโนบที่ผ่านมา และวัดด้วยระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์พาวและวิธีฮอลล์บาร์ ซึ่งจะได้ผลการวัดเป็นรายงานการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากระบบวัดดังรูปที่ 4.22-4.27 เราสามารถแยกวิเคราะห์ผลการวัดได้หลายส่วนดังนี้

1) ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าคู่ใดๆบนฟิล์ม

ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างจะส่งผลโดยตรงกับการจ่ายกระแสลงบนเนื้อสาร สำหรับฟิล์มบางที่ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าคู่ใดๆสูง กระแสที่ใช้ทำการวัดจะต้องต่ำเพื่อความต่างศักย์คร่อมสารตัวอย่างจะไม่เกินระดับที่แหล่งจ่ายกระแสยังสามารถจ่ายให้ได้ ฟิล์มบางส่วนใหญ่จะมีความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่าพวก bulk มากๆแม้ว่าจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกันก็ตาม ระบบวัดนี้ได้รับการออกแบบให้จ่ายกระแสได้ที่แรงดันไฟฟ้าคร่อมโหนดสูงถึง 300 v ทำให้สามารถวัดสารตัวอย่างที่มีความต้านทานระหว่างขั้วได้สูงถึง 15 MΩ เมื่อพิจารณารายงานผลการวัดในช่อง ohm(v-v) ของสารตัวอย่าง

แต่ละชุดและพิจารณาตารางที่ 4.11-4.12 จะพบว่าสารตัวอย่างทั้ง 4 ตัวจะมีความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าอยู่ในช่วง 100Ω - $20\text{ M}\Omega$ จะมีสารตัวอย่างบางตัวที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยระบบวัดนี้ เช่น สารตัวอย่าง #AB2 และ #AB5 ซึ่งมีความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่า $15\text{ M}\Omega$ มาก

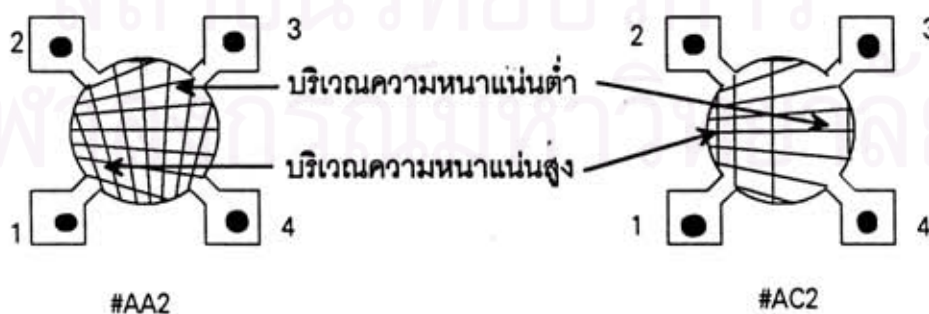
2) ความสมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าและความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์ม

จากรายงานผลการวัดเราสามารถตรวจความสมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าอินทรีย์ได้โดยเปรียบเทียบผลการวัดความต่างศักย์ (ช่อง average V) ในรูปแบบ (config) ต่างๆ ที่ใกล้เคียงกันเช่น 1 กับ 2 , 3 กับ 4,... เป็นต้น เมื่อตรวจสอบรายงานผลการวัดของฟิล์มบาง CuInSe_2 ทั้ง 4 ชั้นพบว่าขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ลงบนฟิล์มบางมีความเป็นอินทรีย์ที่ดี เนื่องจากความต่างศักย์ที่วัดได้จากรูปแบบที่ใกล้เคียงกันแต่ละคู่มักใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เรายังพิจารณาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด (ช่อง SD. สำหรับการวัดด้วยโหมด Fix I) หรือค่าความเป็นเส้นตรงจาก least square method (ช่อง R สำหรับการวัดด้วยโหมด Vary I) ถ้าค่าดังกล่าวมากแสดงว่าขั้วไฟฟ้าไม่เป็นขั้วอินทรีย์ที่สมบูรณ์

สำหรับการวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มเราจะแยกพิจารณาได้เป็นสองกรณีคือ

ก) กรณีวัดด้วยวิธีแวนเดอร์พาว

เนื่องจากรูปทรงของฟิล์มที่ใช้ทำการวัดเป็นแผ่นกลมและขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วอยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกัน ผลการวัดในรูปแบบที่ห่างกันสองรูปแบบคือ 1-3,3-5,5-7,7-1 หรือ 2-4,4-6,6-8,8-2 จะต้องเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก จากรายงานผลการวัดจะเห็นว่า ฟิล์มบาง #AD2 มีความสม่ำเสมอมากที่สุดเนื่องจากความต่างศักย์ที่วัดได้จากแต่ละรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับฟิล์มบาง #AA2 และ #AC2 จะมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสารอยู่ หากวิเคราะห์ความต่างศักย์ที่วัดได้จากรูปแบบ 1- 8 และ ความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้า (Ohm [v-v]) เราคาดว่าโครงสร้างของเนื้อสารของ #AA2,#AC2 ควรเป็นดังนี้



รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายความหนาแน่นของเนื้อฟิล์ม (#AA2,#AC2)

ข) กรณีวัดด้วยวิธีฮอลล์บาร์

เนื่องจากรูปทรงของฟิล์มที่ทำการวัดเป็นแถบยาว เราจะตรวจสอบความสม่ำเสมอตามยาวโดยพิจารณาจากผลการวัดจากรูปแบบที่ 1 และ 3 ซึ่งจะต้องเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก เมื่อพิจารณาผลการวัดจาก จะเห็นว่าเนื้อฟิล์ม #AD5 มีความสม่ำเสมอมากที่สุด สำหรับฟิล์มบาง #AA5 และ #AC5 จะมีเนื้อฟิล์มที่มีความต้านทานต่างกันมากอยู่สองบริเวณบนแถบ

3) การวิเคราะห์สมบัติไฟฟ้าที่วัดได้

เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้ส่วนใหญ่จะมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มอยู่ จากการเปรียบเทียบสภาพต้านทานไฟฟ้าย่อยๆหรือสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ย่อยๆจากสารตัวอย่างแต่ละตัวจากรายงานผลการวัด จะสังเกตได้ว่าการวัดด้วยวิธีวานเดอร์พาวจะได้ผลการวัดย่อยๆมีค่าใกล้เคียงกันและมีความน่าเชื่อมากกว่าวิธีฮอลล์บาร์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากรูปทรงของสารตัวอย่างจากวิธีวานเดอร์พาวมมีบริเวณพื้นที่ทำการวัดสั้นกว่ารูปทรงของวิธีฮอลล์บาร์

สมบัติไฟฟ้าที่วัดได้คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ,สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์,ความหนาแน่นพาหะและชนิดของพาหะ มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของฐานรองดังตารางที่4.11-4.12 จะเห็นได้ว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะยิ่งสูงขึ้นมากหากอุณหภูมิฐานรองต่ำลง แต่สำหรับความเข้มข้นของพาหะ การเปลี่ยนแปลงจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม ดังนั้นฟิล์มบางที่มีสมบัติไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ควรเตรียมในช่วงอุณหภูมิ 350 - 400 °c ซึ่งจะได้ฟิล์มชนิด Pและสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูง

| ฟิล์มบาง | อุณหภูมิ ฐานรอง (°C) | ความต้านทาน ระหว่างขั้วไฟฟ้า (Ohm) | สภาพต้านทาน ไฟฟ้า (ohm-cm) | สภาพเคลื่อนที่ ได้ของฮอลล์ $\text{cm}^2/V.s$ | ความเข้มข้น พาหะ (cm^{-3}) | ชนิดของ พาหะอิสระ |
|----------|----------------------------|--|----------------------------------|--|---|----------------------|
| #AA2 | 250 | 9-15 meg | 550* | 70 | 10^{14} | N |
| #AB2 | 300 | 20 meg | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ |
| #AC2 | 350 | 100 -10k | 1.5* | 9 | 10^{17} | N |
| #AD2 | 400 | <100 | 0.015 | 1 | 10^{20} | P |

ตารางที่ 4.11 สรุปผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบางที่วัดโดยวิธีวานเดอร์พาว

| ฟิล์มบาง | อุณหภูมิ ฐานรอง (°C) | ความต้านทาน ระหว่างขั้วไฟฟ้า (Ohm) | สภาพต้านทาน ไฟฟ้า (ohm-cm) | สภาพเคลื่อนที่ ได้ของฮอลล์ $\text{cm}^2/V.s$ | ความเข้มข้น พาหะ (cm^{-3}) | ชนิดของ พาหะอิสระ |
|----------|----------------------------|--|----------------------------------|--|---|----------------------|
| #AA5 | 250 | 8-18 meg | 360* | 30* | 10^{14} | ไม่แน่นอน |
| #AB5 | 300 | 20 meg | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ | วัดไม่ได้ |
| #AC5 | 350 | 10 -10k | 117* | .001* | 10^{19} | ไม่แน่นอน |
| #AD5 | 400 | 10 -400 | 0.008 | 1 | 10^{20} | P |

* เฉลี่ยจากข้อมูลที่มีค่าต่างกันมาก

ตารางที่ 4.12 สรุปผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์จากฟิล์มบางที่วัดโดยวิธีฮอลล์บาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis #AA2
Datafile      : 01090403.HAL      (1) --- (4)
Thickness(m)  : 0.0000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200          (2) --- (3)
measurement mode : Fix I
method        : van de pauw

```

| Config | Current (A) | average V | SD. (V) | rng ohm(v-v) | Correct V | I | V | B |
|--------|-------------|-----------|----------|--------------|------------|-----|-----|------|
| 1 | 0.000029 | -8.484527 | 0.000059 | 3 13528200 | -18.919106 | 1,2 | 3,4 | off |
| 2 | 0.000029 | 8.442129 | 0.000037 | 3 13620950 | 18.895749 | 2,1 | 3,4 | off |
| 3 | 0.000025 | 4.797703 | 0.000359 | 3 9326790 | 8.865627 | 2,3 | 1,4 | off |
| 4 | 0.000024 | -4.943563 | 0.000049 | 3 9392280 | -9.164593 | 3,2 | 1,4 | off |
| 5 | 0.000026 | -8.803066 | 0.000723 | 3 10477200 | -17.187746 | 3,4 | 1,2 | off |
| 6 | 0.000026 | 8.712763 | 0.000470 | 3 10537300 | 17.059035 | 4,3 | 1,2 | off |
| 7 | 0.000030 | -4.483752 | 0.000103 | 3 14603050 | -10.436157 | 4,1 | 2,3 | off |
| 8 | 0.000029 | 4.523043 | 0.000038 | 3 14641840 | 10.543559 | 1,4 | 2,3 | off |
| 9 | 0.000029 | -3.702088 | 0.000025 | 3 15615730 | -8.957616 | 1,3 | 2,4 | off |
| 10 | 0.000029 | 3.587971 | 0.000040 | 3 15589570 | 8.672965 | 3,1 | 2,4 | off |
| 11 | 0.000023 | -3.779218 | 0.000423 | 3 9985890 | -7.210023 | 2,4 | 1,3 | off |
| 12 | 0.000023 | 3.576024 | 0.000165 | 3 9920120 | 6.800986 | 4,2 | 1,3 | off |
| 13 | 0.000029 | -3.827219 | 0.000325 | 3 15595280 | -9.253269 | 1,3 | 2,4 | up |
| 14 | 0.000029 | 3.747799 | 0.000038 | 3 15578180 | 9.055425 | 3,1 | 2,4 | up |
| 15 | 0.000022 | -3.496710 | 0.000295 | 3 10020030 | -6.681905 | 2,4 | 1,3 | up |
| 16 | 0.000022 | 3.292590 | 0.000095 | 3 9917780 | 6.261244 | 4,2 | 1,3 | up |
| 17 | 0.000029 | -3.554016 | 0.000052 | 3 15639220 | -8.606929 | 1,3 | 2,4 | down |
| 18 | 0.000029 | 3.435583 | 0.000149 | 3 15632610 | 8.318050 | 3,1 | 2,4 | down |
| 19 | 0.000022 | -3.800560 | 0.000024 | 3 9984350 | -7.250207 | 1,4 | 1,3 | down |
| 20 | 0.000022 | 3.590289 | 0.000168 | 3 9965200 | 6.842830 | 4,1 | 1,3 | down |

Result of Resistivity & Hall Measurement

```

Sample name : cis #AA2      Data file : 01090403.HAL
Temperature : 23.00 C      Thickness : 25000.00 A
Magnetfield : 0.720 T      Correction: on

```

| | | | |
|---------|-------|---------|-------|
| Rho13 - | 552.8 | Rho24 - | 571.3 |
| Rho35 - | 556.8 | Rho46 - | 573.5 |
| Rho57 - | 552.0 | Rho68 - | 560.8 |
| Rho71 - | 548.0 | Rho82 - | 558.7 |

AVERAGE RESISTIVITY = 559.2 OHM-cm

| | | | | | |
|----------|-------|-----|----------|-------|-----|
| U 9,13 - | -63.2 | (n) | U10,14 - | -81.8 | (n) |
| U11,15 - | -60.5 | (n) | U12,16 - | -68.8 | (n) |
| U18,10 - | -75.9 | (n) | U17, 9 - | -75.0 | (n) |
| U20,12 - | -95.2 | (n) | U19,11 - | -99.8 | (n) |

AVERAGE HALL MOBILITY = -77 cm.cm / (V.S)
CARRIER CONCENTRATION = -1.4E+14 1/(cm³)

รูปที่ 4.22 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AA2

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis_#AC2
Datafile      : 01101354.HAL          (1)---(4)
Thickness(m)  : 0.0000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200              (2)---(3)
measurement mode : Vary I
method        : van de pauw

```

| Config | Current(A) | average V | R | rng | ohm(v-v) | Correct V | I | V | B |
|--------|------------|-----------|----------|-----|----------|-----------|-----|-----|------|
| 1 | 0.002156 | -5.943833 | 1.000000 | 3 | 9949 | -5.949209 | 1,2 | 3,4 | off |
| 2 | 0.002156 | 5.951391 | 1.000000 | 3 | 9923 | 5.956760 | 2,1 | 3,4 | off |
| 3 | 0.002156 | 0.014627 | 0.999912 | 1 | 0 | 0.014627 | 2,3 | 1,4 | off |
| 4 | 0.002155 | -0.014706 | 0.999900 | 1 | 0 | -0.014706 | 3,2 | 1,4 | off |
| 5 | 0.002155 | -5.953056 | 0.999999 | 3 | 5469 | -5.956015 | 3,4 | 1,2 | off |
| 6 | 0.002155 | 5.942451 | 0.999998 | 3 | 5503 | 5.945424 | 4,3 | 1,2 | off |
| 7 | 0.002155 | -0.014466 | 0.999992 | 1 | 0 | -0.014466 | 4,1 | 2,3 | off |
| 8 | 0.002155 | 0.014471 | 0.999995 | 1 | 0 | 0.014471 | 1,4 | 2,3 | off |
| 9 | 0.002155 | -5.913953 | 0.999999 | 3 | 6687 | -5.917548 | 1,3 | 2,4 | off |
| 10 | 0.002155 | 5.923692 | 0.999999 | 3 | 6698 | 5.927299 | 3,1 | 2,4 | off |
| 11 | 0.002154 | -5.953670 | 1.000000 | 3 | 8836 | -5.958452 | 2,4 | 1,3 | off |
| 12 | 0.002154 | 5.928732 | 0.999999 | 3 | 8819 | 5.933485 | 4,2 | 1,3 | off |
| 13 | 0.002155 | -5.919238 | 0.999999 | 3 | 6679 | -5.922832 | 1,3 | 2,4 | up |
| 14 | 0.002155 | 5.932624 | 0.999999 | 3 | 6700 | 5.936238 | 3,1 | 2,4 | up |
| 15 | 0.002155 | -5.943477 | 1.000000 | 3 | 8829 | -5.948247 | 2,4 | 1,3 | up |
| 16 | 0.002154 | 5.918331 | 0.999999 | 3 | 8815 | 5.923074 | 4,2 | 1,3 | up |
| 17 | 0.002155 | -5.910295 | 0.999999 | 3 | 6689 | -5.913889 | 1,3 | 2,4 | down |
| 18 | 0.002154 | 5.913247 | 0.999999 | 3 | 6696 | 5.916847 | 3,1 | 2,4 | down |
| 19 | 0.002154 | -5.963663 | 1.000000 | 3 | 8838 | -5.968454 | 2,4 | 1,3 | down |
| 20 | 0.002154 | 5.942822 | 0.999999 | 3 | 8827 | 5.947591 | 4,2 | 1,3 | down |

Result of Resistivity & Hall Measurement

```

Sample name : cis_#AC2      Data file : 01101354.HAL
Temperature : 23.00 C      Thickness : 25000.00 A
Magnetfield : 0.720 T     Correction: on

```

```

Rho13 - 1.5      Rho24 - 1.5
Rho35 - 1.5      Rho46 - 1.5
Rho57 - 1.5      Rho68 - 1.5
Rho71 - 1.5      Rho82 - 1.5

```

AVERAGE RESISTIVITY = 1.5 OHM-cm

```

U 9,13 - -5.4 (n)      U10,14 - -9.1 (n)
U11,15 - -13.3 (n)     U12,16 - -10.7 (n)
U18,10 - -7.9 (n)      U17, 9 - -3.7 (n)
U20,12 - -14.5 (n)     U19,11 - -10.2 (n)

```

AVERAGE HALL MOBILITY = -9.3 cm.cm/(V.S)
CARRIER CONCENTRATION = -4.2E+17 1/(cm³)

รูปที่ 4.23 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AC2

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis_#AD2
Datafile      : 01100117.HAL          (1)---(4)
Thickness(m)  : 0.0000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200              (2)---(3)
measurement mode : Vary I
method        : van de pauw

```

| Config | Current(A) | average V | R | rng ohm(v-v) | Correct V | I | V | B |
|--------|------------|-----------|----------|--------------|-------------|-----|-----|------|
| 1 | 0.002855 | -0.038201 | 1.000000 | 1 | 0 -0.038201 | 1,2 | 3,4 | off |
| 2 | 0.002855 | 0.038201 | 1.000000 | 1 | 0 0.038201 | 2,1 | 3,4 | off |
| 3 | 0.002855 | 0.042027 | 1.000000 | 1 | 0 0.042027 | 2,3 | 1,4 | off |
| 4 | 0.002855 | -0.042022 | 1.000000 | 1 | 0 -0.042022 | 3,2 | 1,4 | off |
| 5 | 0.002855 | -0.038204 | 1.000000 | 1 | 0 -0.038204 | 3,4 | 1,2 | off |
| 6 | 0.002855 | 0.038199 | 1.000000 | 1 | 0 0.038199 | 4,3 | 1,2 | off |
| 7 | 0.002855 | -0.041995 | 1.000000 | 1 | 0 -0.041995 | 4,1 | 2,3 | off |
| 8 | 0.002855 | 0.042019 | 1.000000 | 1 | 0 0.042019 | 1,4 | 2,3 | off |
| 9 | 0.002854 | 0.003829 | 1.000000 | 1 | 0 0.003829 | 1,3 | 2,4 | off |
| 10 | 0.002854 | -0.003820 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003820 | 2,0 | 2,4 | off |
| 11 | 0.002855 | 0.003825 | 1.000000 | 1 | 0 0.003825 | 2,4 | 1,3 | off |
| 12 | 0.002855 | -0.003820 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003820 | 4,2 | 1,3 | off |
| 13 | 0.002854 | 0.003833 | 1.000000 | 1 | 0 0.003833 | 1,3 | 2,4 | up |
| 14 | 0.002854 | -0.003831 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003831 | 3,1 | 2,4 | up |
| 15 | 0.002855 | 0.003803 | 1.000000 | 1 | 0 0.003803 | 2,4 | 1,3 | up |
| 16 | 0.002855 | -0.003799 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003799 | 4,2 | 1,3 | up |
| 17 | 0.002854 | 0.003821 | 1.000000 | 1 | 0 0.003821 | 1,3 | 2,4 | down |
| 18 | 0.002855 | -0.003813 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003813 | 3,1 | 2,4 | down |
| 19 | 0.002854 | 0.003846 | 1.000000 | 1 | 0 0.003846 | 2,4 | 1,3 | down |
| 20 | 0.002855 | -0.003842 | 1.000000 | 1 | 0 -0.003842 | 4,2 | 1,3 | down |

Result of Resistivity & Hall Measurement

```

Sample name : cis_#AD2      Data file : 01100117.HAL
Temperature : 23.00 C      Thickness : 25000.00 A
Magnetfield : 0.720 T      Correction: on

```

```

Rho13 - 0.0159      Rho24 - 0.0159
Rho35 - 0.0159      Rho46 - 0.0159
Rho57 - 0.0159      Rho68 - 0.0159
Rho71 - 0.0159      Rho82 - 0.0159

```

AVERAGE RESISTIVITY = 0.0159 OHM-cm

```

U 9,13 - 0.3 (p)      U10,14 - 0.8 (p)
U11,15 - 1.6 (p)      U12,16 - 1.6 (p)
U18,10 - 0.6 (p)      U17, 9 - 0.6 (p)
U20,12 - 1.6 (p)      U19,11 - 1.7 (p)

```

AVERAGE HALL MOBILITY = 1.1 cm.cm/(V.S)
CARRIER CONCENTRATION = 3.4E+20 1/(cm³)

รูปที่ 4.24 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AD2

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis_#AA5
Datafile      : 01082333.HAL
Thickness(m)  : 0.000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200
measurement mode : Fix I
method        : hall bar
  
```

| Config | Current(A) | average V | SD. (V) | rng | ohm(v-v) | Correct V | I | V | B |
|--------|------------|------------|----------|-----|----------|------------|-------|-----|------|
| 1 | 0.000029 | -33.622673 | 0.002140 | 4 | 13543220 | -78.707749 | 1*,2* | 1,2 | off |
| 2 | 0.000029 | 33.659935 | 1.061747 | 4 | 13579040 | 78.914351 | 2*,1* | 1,2 | off |
| 3 | 0.000029 | -58.423040 | 0.001170 | 4 | 15429920 | -147.67678 | 1*,2* | 2,3 | off |
| 4 | 0.000029 | 58.601067 | 0.000125 | 4 | 15353600 | 147.68394 | 2*,1* | 2,3 | off |
| 5 | 0.000029 | -81.563535 | 0.001220 | 4 | 18482730 | -230.82262 | 1*,2* | 1,3 | off |
| 6 | 0.000030 | 81.558456 | 0.000192 | 4 | 18739330 | 232.88031 | 2*,1* | 1,3 | off |
| 7 | 0.000029 | 50.438173 | 0.000384 | 4 | 8559500 | 93.183277 | 1*,2* | 2,4 | off |
| 8 | 0.000029 | -49.539900 | 0.000804 | 4 | 8520010 | -91.330043 | 2*,1* | 2,4 | off |
| 9 | 0.000029 | 50.694100 | 0.000374 | 4 | 8579590 | 93.756931 | 1*,2* | 2,4 | up |
| 10 | 0.000029 | -49.288026 | 0.002520 | 4 | 8424340 | -90.398827 | 2*,1* | 2,4 | up |
| 11 | 0.000029 | 50.129158 | 0.001606 | 4 | 8508960 | 92.361534 | 1*,2* | 2,4 | down |
| 12 | 0.000029 | -49.790775 | 0.003615 | 4 | 8599190 | -92.182887 | 2*,1* | 2,4 | down |

Result of Resistivity & Hall Measurement

Sample name : cis_#AA5 Data file : 01082333.HAL
 Temperature : 23.00 C Thickness : 25000.00 A
 Magnetfield : 0.720 T Correction: on

Resistivity

rho1 =255.0 rho2 =256.0
 rho3 =479.1 rho4 =479.0
 rho5 =374.4 rho6 =365.0

average resistivity = 368.2 ohm-cm

Hall mobility

u7-9 = -186.5 (n) u10-8 = 302.7 (p)
 u11-7 = -267.1 (n) u8-12 = 277.2 (p)

average mobility = 31 cm.cm/v.s (p)

n = 5.4E+0014 1/(cm³)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.25 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AA5

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis_#AC5
Datafile      : 01072131.HAL
Thickness(m)  : 0.0000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200
measurement mode : Vary I
method        : hall bar
  
```

| Config | Current(A) | average V | R | rng ohm(v-v) | Correct V | I | V | B |
|--------|------------|------------|----------|--------------|-----------|-----------|-------|----------|
| 1 | 0.001000 | -0.370335 | 1.000000 | 1 | 0 | -0.370335 | *1,*2 | 1,2 off |
| 2 | 0.001000 | 0.384328 | 1.000000 | 1 | 0 | 0.384328 | *2,*1 | 1,2 off |
| 3 | 0.001000 | -1856.8988 | 1.000000 | 4 | 3073880 | -2422.035 | *1,*2 | 2,3 off |
| 4 | 0.001000 | 1896.1976 | 1.000000 | 4 | 3517590 | 2556.598 | *2,*1 | 2,3 off |
| 5 | 0.001000 | -1868.3813 | 1.000000 | 4 | 3078610 | -2437.888 | *1,*2 | 1,3 off |
| 6 | 0.001000 | 1894.7974 | 1.000000 | 4 | 3512820 | 2553.815 | *2,*1 | 1,3 off |
| 7 | 0.001000 | 0.420424 | 1.000000 | 1 | 0 | 0.420424 | *1,*2 | 2,4 off |
| 8 | 0.001000 | -0.436573 | 1.000000 | 1 | 0 | -0.436573 | *2,*1 | 2,4 off |
| 9 | 0.001000 | 0.419591 | 1.000000 | 1 | 0 | 0.419591 | *1,*2 | 2,4 up |
| 10 | 0.001000 | -0.433148 | 1.000000 | 1 | 0 | -0.433148 | *2,*1 | 2,4 up |
| 11 | 0.001000 | 0.418921 | 1.000000 | 1 | 0 | 0.418921 | *1,*2 | 2,4 down |
| 12 | 0.001000 | -0.433942 | 1.000000 | 1 | 0 | 0.418921 | *2,*1 | 2,4 down |

Result of Resistivity & Hall Measurement

```

Sample name : cis_#AC5      Data file : 01072131.HAL
Temperature : 23.00 C      Thickness : 25000.00 A
Magnetfield : 0.720 T      Correction: on
  
```

Resistivity

```

rho1 =0.03          rho2 =0.036
rho3 =227.91        rho4 =240.57
rho5 =114.70        rho6 =120.15
  
```

average resistivity =117.23 ohm-cm

Hall mobility

```

u7-9 = 0.02 (p)      u10-8 = 0.101 (p)
u11-7 = -0.04 (n)    u8-12 = -0.078 (n)
  
```

average mobility = 0.001 cm.cm/V.s

n = 5.8E+19 1/(cm³)

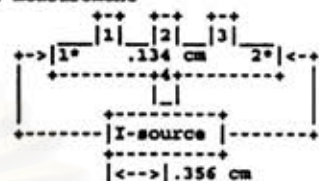
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.26 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AC5

Raw data of Resistivity & Hall measurement

```

Dataname      : cis_#AD5
Datafile      : 01081038.HAL
Thickness(m)  : 0.0000025000
Temperature(c) : 23.00
Magnetfield(T) : 0.7200
measurement mode : Vary I
method        : hall bar
  
```



```

Config Current(A) average V      R   rng ohm(v-v)  Correct V      I      V      B
-----
1  0.001000 -0.085701  1.000000 3      280 -0.085703  1*,2* 1,2  off
2  0.001000  0.085769  1.000000 3      277  0.085772  2*,1* 1,2  off
3  0.001000 -0.094702  1.000000 3      287 -0.094705  1*,2* 2,3  off
4  0.001000  0.094755  1.000000 3      287  0.094757  2*,1* 2,3  off
5  0.001000 -0.180564  1.000000 3      387 -0.180570  1*,2* 1,3  off
6  0.001000  0.180610  1.000000 3      388  0.180616  2*,1* 1,3  off
7  0.001000 -0.000442  1.000000 1         0 -0.000442  1*,2* 2,4  off
8  0.001000  0.000450  1.000999 1         0  0.000450  2*,1* 2,4  off
9  0.001000 -0.000446  1.000000 1         0 -0.000446  1*,2* 2,4  up
10 0.001000  0.000454  1.000999 1         0  0.000454  2*,1* 2,4  up
11 0.001000 -0.000439  1.000000 1         0 -0.000439  1*,2* 2,4  down
12 0.001000  0.000447  1.000999 1         0  0.000447  2*,1* 2,4  down
  
```

Result of Resistivity & Hall Measurement

Sample name : cis_#AD5 Data file : 01081038.HAL
 Temperature : 23.00 C Thickness : 25000.00 Å
 Magnetfield : 0.720 T Correction: on

Resistivity

rho1 =0.0080 rho2 =0.0080
 rho3 =0.0089 rho4 =0.0089
 rho5 =0.0084 rho6 =0.0084

average resistivity =0.0084 ohm-cm

Hall mobility

u7-9 = 1.6 (p) u10-8 = 1.6 (p)
 u11-7 = 1.2 (p) u8-12 = 1.2 (p)

average mobility = 1.4 cm²/V.s

n = 5.1E+20 1/(cm³)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.27 รายงานผลการวัดฟิล์มบาง #AD5



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผล

ในงานวิจัยนี้เราได้ผลการวิจัยตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนการสร้างระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่สร้างขึ้นมีขีดความสามารถตรงตามที่ต้องการคือ

ก) สามารถวัดได้ทั้งเทคนิคของวานเดอร์พาวและเทคนิคของฮอลล์ โดยผลการวัดที่ได้จากทั้งสองเทคนิคมีความสอดคล้องซึ่งกันและกัน ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaAs ด้วยวิธีทั้งสองได้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงสามารถประยุกต์การวัดทั้งสองวิธีนี้เข้ากับสารตัวอย่างชนิดอื่นได้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองวัดเปรียบเทียบโดยใช้สารตัวอย่างฟิล์มบางของ CuInSe_2 แทน จะได้ผลการวัดจากทั้งสองวิธีแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงและขัดแย้งกับที่กล่าวในข้างต้น ในกรณีดังกล่าวนี้ มีสาเหตุมาจากการก่อตัวของฟิล์มไม่สม่ำเสมอในแต่ละชั้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำให้เห็นว่าการวัดจากทั้งสองวิธีมีความเหมาะสมต่างกัน เช่น เทคนิคของฮอลล์ เหมาะสมกับตัวอย่างที่เราทราบว่ามีเนื้อสารสม่ำเสมอ และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูง ซึ่งจะได้ผลการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่า

ข) สามารถทำการวัดได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบผู้ใช้วัดเองได้เป็นอย่างดี

ค) วัดสารตัวอย่างที่มีความต้านทานในย่านกว้างได้ดีและมีความถูกต้องสูง เนื่องจากระบบวัดนี้มีแหล่งจ่ายกระแสที่ควบคุมได้ตั้งแต่ 20 μA ถึง 50 mA โดยจ่ายแรงดันได้ถึง 300 V จึงสามารถจ่ายกระแสให้สารตัวอย่างที่มีความต้านทานได้สูงถึง 15-20 M Ω ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยวงจรตัวต้านทาน แสดงให้เห็นว่าระบบวัดสามารถวัดข้อมูลสภาพต้านทานได้อย่างถูกต้อง โดยข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุดในช่วง ที่ความต้านทาน (ระหว่างช่วงความต่างศักย์) ของสารน้อยกว่า 0.5 M Ω สำหรับความต้านทานค่าที่สูงกว่านี้จะให้ข้อมูลที่ผิดพลาด

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการปรับแก้ข้อมูลโดยการชดเชยด้วยความต้านทานของสารและของมิเตอร์ จะได้ข้อมูลที่ถูกต้องเช่นเดิมและสามารถขยายขอบเขตการวัดออกไปจนถึงประมาณ 15 - 20 M Ω ซึ่งเป็นจะเป็นขีดจำกัดของแหล่งจ่ายกระแส ขอบเขตการวัดขนาดนี้ถือว่ามาก

พอสำหรับการศึกษาสารสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทั่วไป หากต้องการปรับปรุงให้ขอบเขตการวัดกว้างกว่านี้อาจปรับปรุงได้โดย

1. ปรับปรุงวงจรกระแสคงที่ให้ควบคุมระดับกระแสคงที่ได้ต่ำกว่า 20 μA และเพิ่มวงจรเพิ่มความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ หรือ เลือกใช้โวลต์มิเตอร์รุ่นที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เช่น อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley model 617 แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ อิเล็กโตรมิเตอร์มีราคาแพงมากและมีขีดจำกัดเมื่อทำการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์

2. เปลี่ยนการจ่ายกระแสให้เป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่แทน รวมทั้งเพิ่มวงจรเพิ่มความต้านทานภายในของโวลต์มิเตอร์ด้วย ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการวัดสารที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงๆ เช่น ฟิล์มบาง cadmium sulfide (CdS) เป็นต้น

ง) สามารถทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำได้ดี ซึ่งพิจารณาได้จากการวัดสารตัวอย่าง InSb ข้อมูลที่วัดได้ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสมบัติไฟฟ้าต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะความหนาแน่นของพาหะอิสระจะมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยจากผลการวิเคราะห์เราได้ E_g ของสารตัวอย่าง ประมาณ 0.245 eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้มีการรายงานไว้ [15] นอกจากนี้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ตามอุณหภูมิ จะได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับทฤษฎีการกระเจิงในบทที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบว่ากลไกการกระเจิงของพาหะอิสระในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอย่างไร

อย่างไรก็ตามเราอาจศึกษาสมบัติไฟฟ้าของ InSb ได้กว้างกว่านี้ เช่น การวัดพลังงานไอโอไนซ์เซชันของอะตอมสิ่งเจือปน จากความสัมพันธ์ของสภาพต้านทานไฟฟ้าและอุณหภูมิ หรือ ศึกษากลไกการกระเจิงของพาหะอิสระแบบอื่นๆ โดยการเปลี่ยนของเหลวที่ใช้ทำความเย็นในระบบวัดให้เป็นฮีเลียมเหลว

2. ส่วนการปรับปรุงเทคนิคการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าแบบอินทรีย์

เราอาจกล่าวได้ว่า เทคนิคการเตรียมขั้วไฟฟ้าอินทรีย์ที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้ ทำให้ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้เป็นอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรายงานผลการวัดข้อมูลของสารตัวอย่างแต่ละชิ้น นอกจากนี้สำหรับ GaAs และ InSb ผลการวัดที่อุณหภูมิต่ำยังแสดงให้เห็นว่า ขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวัด โดยเฉพาะ GaAs ซึ่งให้ผลการวัดที่มีความคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ 110-300 K

สำหรับการวัดฟิล์มบางตัวอย่าง CuInSe_2 ซึ่งใช้กาเวเงินเป็นขั้วไฟฟ้าและใช้วิธีเตรียมขั้วไฟฟ้าจากตอนต้นบทที่ 4 รายงานจากการวัดได้แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นไม่มีผล

กระทบกับการวัด

3. การศึกษาสารตัวอย่าง GaAs, InSb และ CuInSe₂ โดยใช้ระบบวัดที่สร้างขึ้น และเทคนิคในการทำขั้วโอห์มมิกที่ปรับปรุง

จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของสารตัวอย่าง GaAs และ InSb ที่อุณหภูมิต่ำ จะพบว่าสมบัติไฟฟ้าของ GaAs ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกช่วงอุณหภูมิช่วงนี้ว่าช่วงอิมิตัว โดยมีค่าความเข้มข้นพาหะอิสระประมาณ $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ สำหรับ InSb จะมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไฟฟ้าตามอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถวัดความเข้มข้นพาหะอิสระในช่วงอิมิตัวได้ประมาณ $1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นพาหะอิสระของสารทั้งสองชนิดพบว่า เราเห็นการเปลี่ยนแปลงของพาหะในช่วงอินทรีนสิกของ InSb ได้ชัดกว่าของ GaAs เนื่องจาก InSb มีปริมาณพาหะอิสระที่มาจากอะตอมผู้ให้ยังผล (effective donor) ค่อนข้างน้อยกว่า GaAs หรือ GaAs ได้รับการเจือด้วยอะตอมสิ่งเจือปน มากกว่า InSb ประมาณ 10^5 เท่า ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่าถ้าต้องการวัดสมบัติไฟฟ้าที่แปรตามอุณหภูมิในช่วงอินทรีนสิกให้เห็นเด่นชัดกว่านี้เราสามารถทำได้โดย เลือก GaAs ที่มีการเติมสิ่งเจือปนน้อยๆ หรือ ทำการวัดสารตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงๆ

สำหรับการวัดฟิล์มบาง CuInSe₂ ที่เตรียมขึ้นบนฐานรอง (substrate) ที่มีอุณหภูมิต่างๆ จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง เราสามารถคาดเดาได้ว่าอุณหภูมิในช่วง 350-400 °C เป็นช่วงที่จะเตรียมให้ได้ฟิล์มบางที่มีสมบัติเหมาะสม สำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง สำหรับข้อมูลการกระจายของเนื้อฟิล์มที่วิเคราะห์ได้ จะมีประโยชน์สำหรับการปรับแก้ระบบเตรียมฟิล์มเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีเนื้อฟิล์มสม่ำเสมอ เช่น อาจแก้ได้โดยหมุนฐานรองตลอดเวลาในขณะที่เตรียมฟิล์ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายการอ้างอิง

1. David C. look, Electrical characterization of GaAs materials and devices ,John Wiley & Sons,NewYork ,1989.
2. Dieter K. Schroder, Semiconductor material and device characterization ,pp.195-200, John Wiley & Sons,NewYork ,1990.
3. van der PAUW ,L.. J. , " A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape",Philips Res. Repts. , 13 , 1-9 ,1958.
4. R.C. Eden and W. H. Zakrzewski, "Semiautomatic Hall Effect Measurement System", Rev. of Scientific instruments, 41 ,1030-1033 ,1970.
5. J. Shewchun ,K. M.Ghanekar, and R. YaGer," A Computer Controlled Automatic System for Measuring the Conductivity and Hall effect in Semiconducting Samples",Rev. of Scientific instruments, 42 ,1797-1806, 1971.
6. Smith , R.A.,Semiconductors, pp.77-96 ,Cambridge University Press,London,2nd ed., 1978.
7. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices , pp.16-27 , John Wiley & Sons, NewYork,2nd ed., 1981.
8. กัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์ * การศึกษารอยต่อแบบพี-เอ็นไอโมจังค์ชันของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ * บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2530.
9. P.Blood and J.W. orton, The electrical characterization of semiconductors:Majority carriers and electron states ,pp 99-102, Academic Press Limited,1992.
10. Malcolm M. Cumming,Hall effect measurements on GaAs and InSb Grown by molecular beam epitaxy. Thesis Ph.D.,University of Gothenburg,1991.
11. David C. look, Electrical characterization of GaAs materials and devices ,pp.91, John Wiley & Sons,NewYork ,1989.

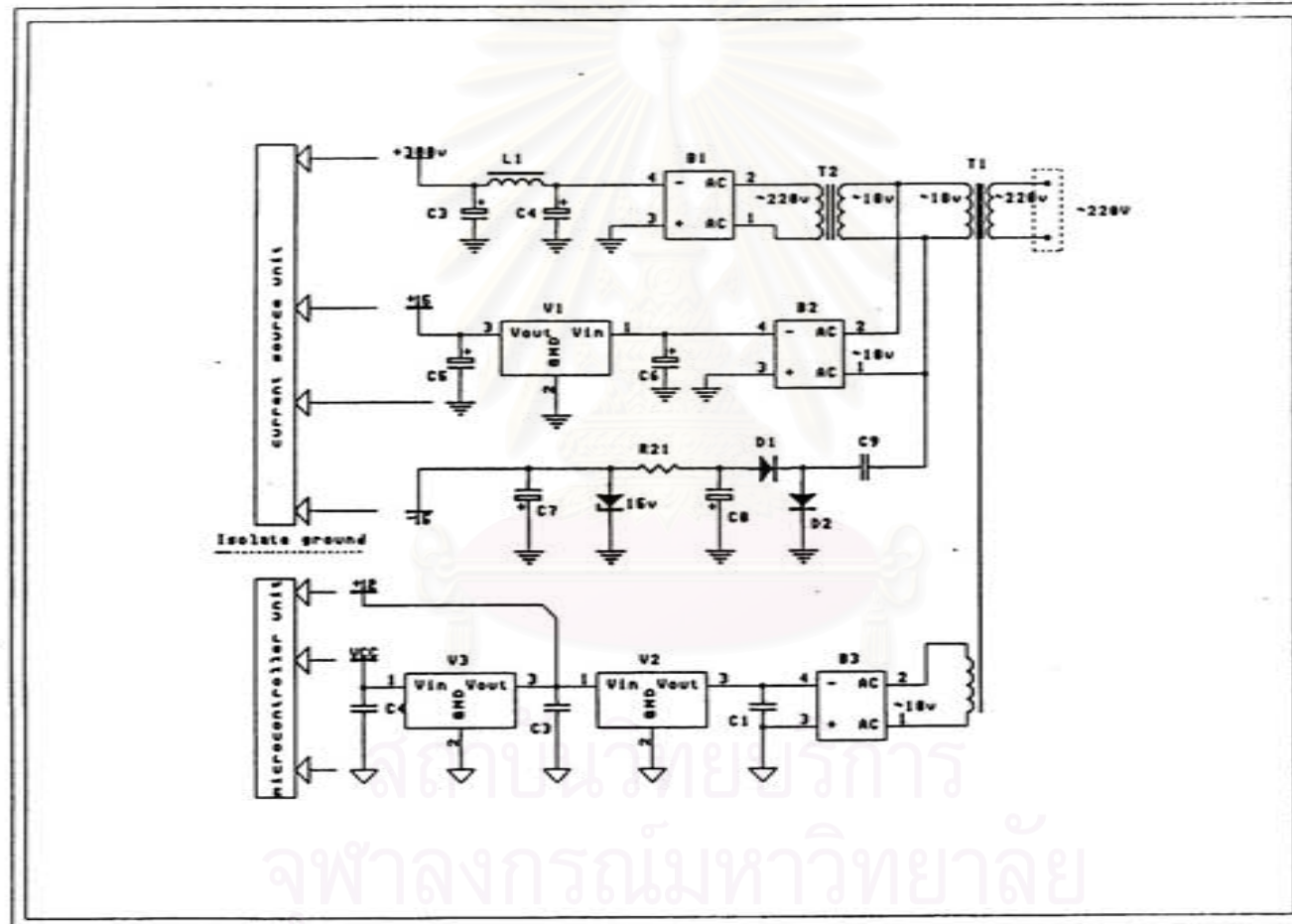
12. P.Blood and J.W. orton, The electrical characterization of semiconductors:Majority carriers and electron states ,pp 95-99, Academic Press Limited,1992.
13. Dieter K. Schroder, Semiconductor material and device characterization ,pp.99-104, John Wiley & Sons,NewYork ,1990.
14. William W. Hager, Applied numerical linear algebbra , pp.151-154,Prentice Hall International,Inc, 1988.
15. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices , pp.849 , John Wiley & Sons, NewYork,2nd ed., 1981.
16. ชาญวิทย์ จิตยุทธการ * การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ * บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2538.



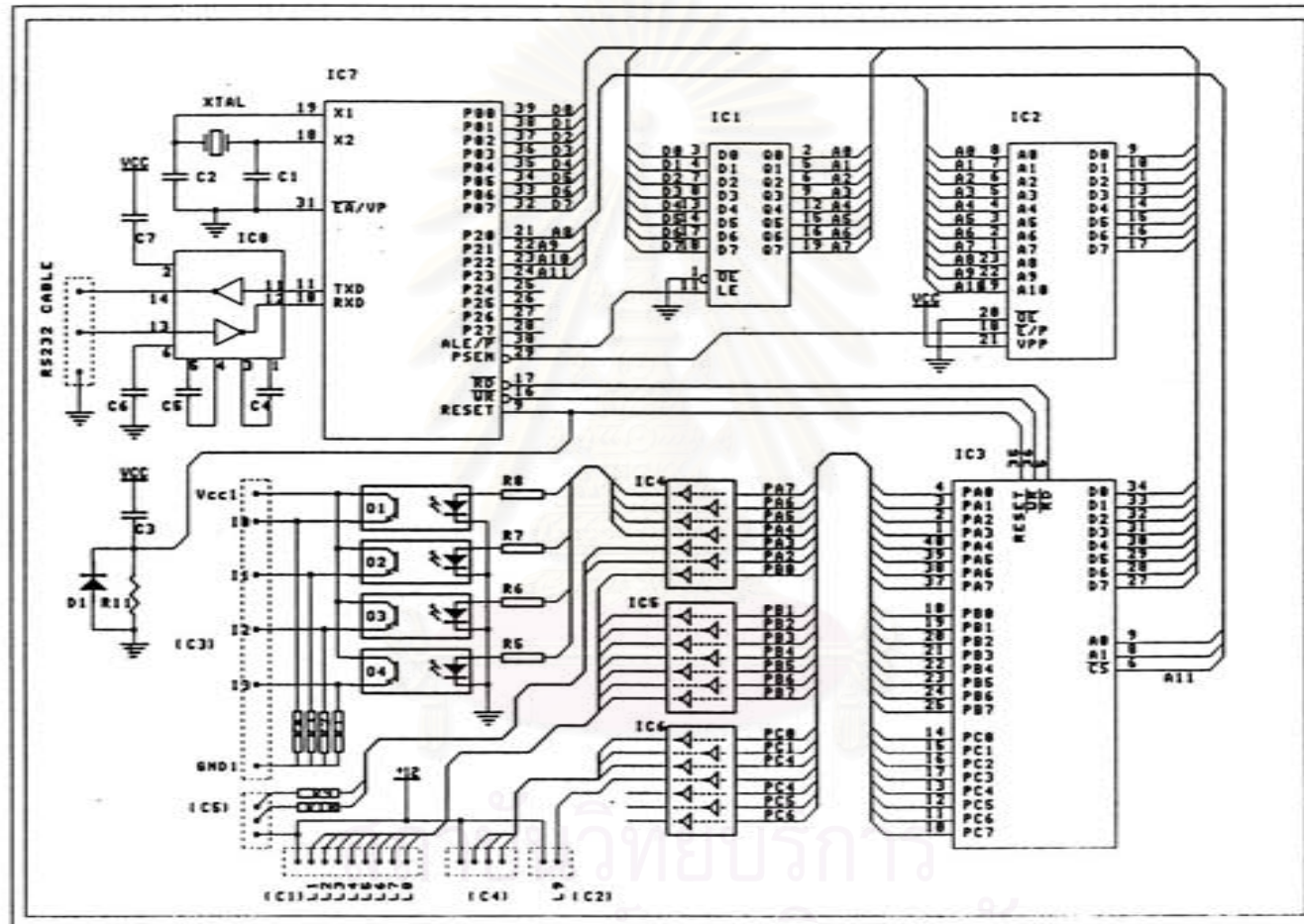
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

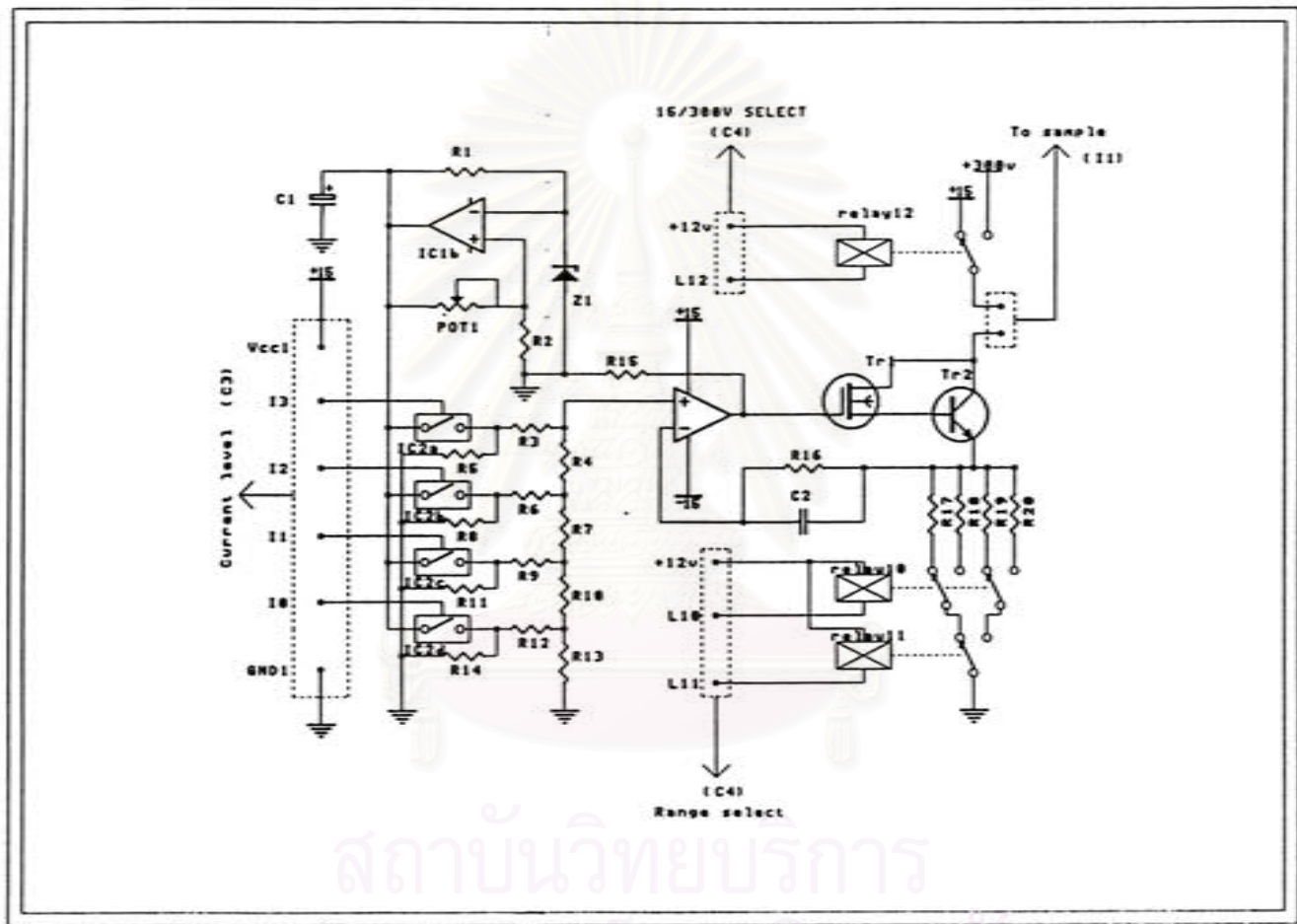
วงจรควบคุมระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์



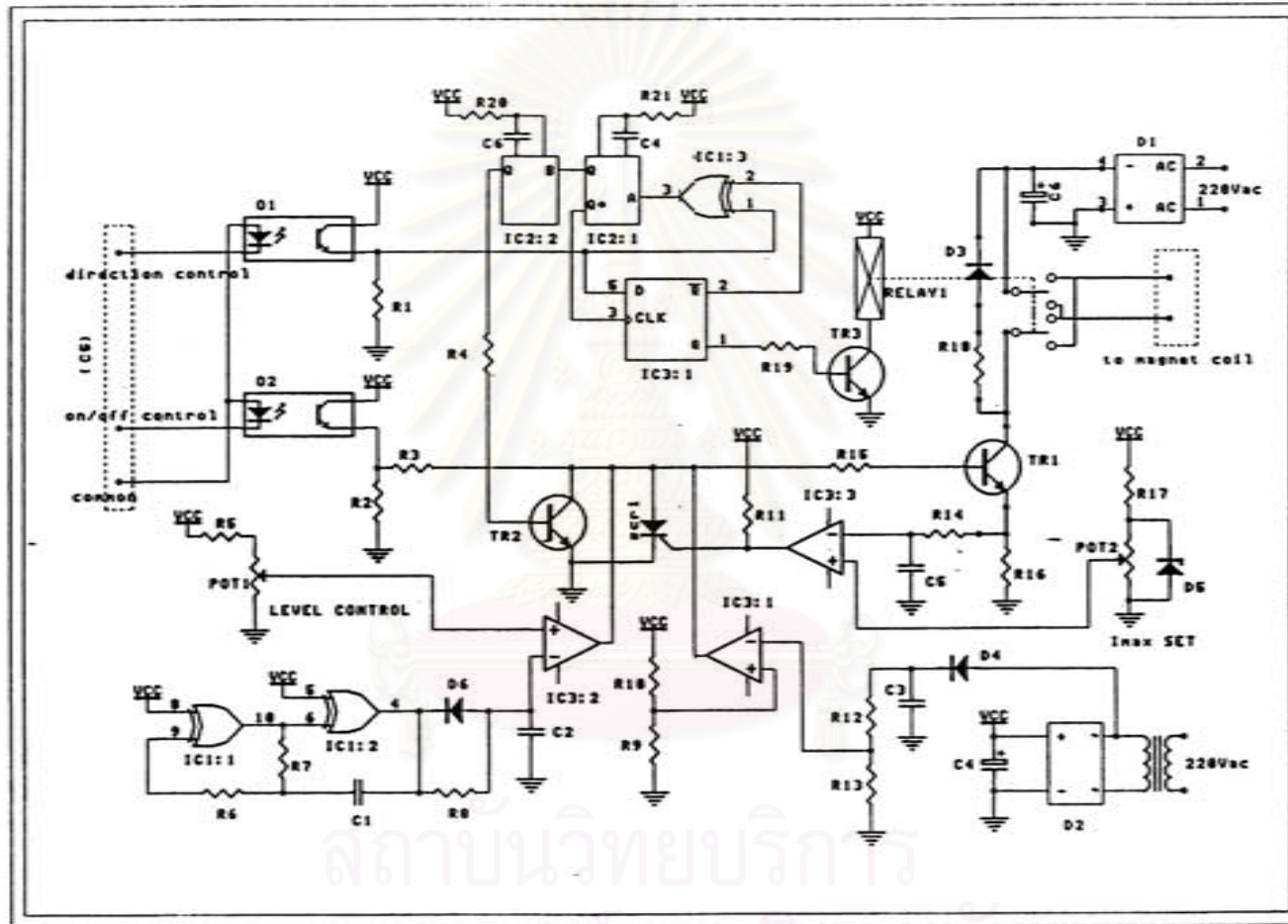
วงจรที่ 1 แหล่งจ่ายไฟสำหรับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรจ่ายกระแสคงที่



วงจรที่ 2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller unit)



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 วงจรที่ 3 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (current source unit)



วงจรที่ 4 วงจรควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้า (electro-magnet controller unit)

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลจำเพาะของมัลติมิเตอร์ Keithley 196
สำหรับการวัดความต่างศักย์และความต้านทานไฟฟ้า

DC VOLTS
16 1/2 Digits

| RANGE | RESOLUTION | INPUT RESISTANCE | ACCURACY ¹ ± (%rdg + counts) | | | TEMPERATURE COEFFICIENT ± (%rdg + counts)/°C 0°-18° & 28°-50°C |
|--------|------------|------------------|--|-------------------------|-------------------------|--|
| | | | 24 Hr., 23° ± 1°C | 90 Days, 18°-28°C | 1 Year, 18°-28°C | |
| 300 mV | 100 nV | > 1 GΩ | 0.0020 + 20 ² | 0.005 + 20 ² | 0.008 + 20 ² | 0.0006 + 10 |
| 3 V | 1 µV | > 1 GΩ | 0.0013 + 10 | 0.003 + 20 | 0.0038 + 20 | 0.0004 + 1 |
| 30 V | 10 µV | 11 MΩ | 0.0015 + 10 | 0.006 + 20 | 0.006 + 30 | 0.0013 + 3 |
| 300 V | 100 µV | 10.1 MΩ | 0.003 + 10 | 0.009 + 20 | 0.009 + 30 | 0.0013 + 1 |

¹For 5 1/2-digit accuracy, divide count error by 10. For 4 1/2-digit accuracy, count error is 5 (except 15 on 300mV range). For 3 1/2-digit accuracy, count error is 5.

²Relative to calibration standards.

³When properly zeroed.

ANALOG SETTling TIME: < 1ms (< 2ms on 300mV range), to 0.01% of step change.

CMRR: > 120dB at dc, 50Hz or 60Hz (± 0.05%) with 1kΩ in either lead.

NMRR: > 60dB at 50Hz or 60Hz (± 0.05%).

LINEARITY: Linearity is defined as the maximum deviation from a straight line between the readings at zero and full range: 10ppm of range for 3V-300V ranges; 15ppm of range for 300mV range; at 23°C ± 1°C

MAXIMUM ALLOWABLE INPUT: 300V rms, 425V peak, whichever is less.

TRMS AC VOLTS

5 1/2 Digits

| RANGE | RESOLUTION | INPUT RESISTANCE | ACCURACY ¹ ± (%rdg + counts) | | | |
|--------|------------|------------------|--|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | 20Hz-20kHz ² | 30Hz-200Hz ² | 200Hz-10kHz ² | 10kHz-20kHz ² |
| 300 mV | 1 µV | 2 + 100 | 0.3 + 100 | 0.15 + 100 | 0.4 + 200 | 2.0 + 300 |
| 3 V | 10 µV | 2 + 100 | 0.3 + 100 | 0.15 + 100 | 0.3 + 200 | 1.5 + 300 |
| 30 V | 100 µV | 2 + 100 | 0.3 + 100 | 0.15 + 100 | 0.4 + 200 | 1.5 + 300 |
| 300 V | 1 mV | 2 + 100 | 0.3 + 100 | 0.15 + 100 | 0.4 + 200 | 1.5 + 300 |

¹For 4 1/2-digit accuracy, divide count error by 10. For 3 1/2-digit accuracy, count error is 5. In 3 1/2- and 4 1/2-digit modes, specifications apply for inputs > 200Hz.

²For sinewave inputs > 2,000 counts.

³For sinewave inputs > 20,000 counts.

RESPONSE: True root mean square, ac coupled.

CREST FACTOR (ratio of peak to rms): Up to 3:1 allowable.

NONSINUSOIDAL INPUTS: For fundamental frequencies < 1kHz, crest factor < 3, add 0.25% of reading to specified accuracy for 300mV and 3V ranges; add 0.6% of reading to specified accuracy for 30V and 300V ranges.

INPUT IMPEDANCE: 1MΩ shunted by < 120pF.

3dB BANDWIDTH: 300kHz typical.

MAXIMUM ALLOWABLE INPUT: 300V rms, 425V peak, 10⁴ V/Hz, whichever is less.

SETTLING TIME: 1 second to within 0.1% of change in reading.

TEMPERATURE COEFFICIENT (0°-18°C & 28°-50°C):

< ±(0.1 × applicable accuracy specification)/°C below 20kHz.

±(0.2x) for 20kHz to 100kHz.

CMRR: > 60dB at 50Hz or 60Hz (± 0.05%) with 1kΩ in either lead

dB (Ref. = 1V):

| INPUT | ACCURACY ± dB 1 Year, 18°-28°C | | RESOLUTION |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|------------|
| | 20Hz-20kHz | 20kHz-100kHz | |
| -34 to +49 dB (20mV to 300V) | 0.2 | 0.4 | 0.01 dB |
| -54 to -34 dB (2mV to 20mV) | 1.1 | 3 ¹ | 0.01 dB |

¹Typical.

OHMS

16 1/2 Digits

| RANGE | RESOLUTION | NOMINAL I-SHORT | ACCURACY ¹ ± (%rdg + counts) | | | TEMPERATURE COEFFICIENT ± (%rdg + counts)/°C 0°-18° & 28°-50°C |
|---------------------|------------|-----------------|--|-------------------------|-------------------------|--|
| | | | 24 Hr., 23° ± 1°C | 90 Days, 18°-28°C | 1 Year, 18°-28°C | |
| 300 Ω | 100 µΩ | 1.7 mA | 0.0025 + 20 ³ | 0.008 + 20 ³ | 0.010 + 20 ³ | 0.001 + 7 |
| 3 kΩ | 1 mΩ | 1.7 mA | 0.0025 + 20 | 0.005 + 20 | 0.007 + 20 | 0.001 + 1 |
| 30 kΩ | 10 mΩ | 160 µA | 0.0025 + 20 | 0.005 + 20 | 0.007 + 20 | 0.001 + 1 |
| 300 kΩ | 100 mΩ | 30 µA | 0.006 + 20 | 0.020 + 20 | 0.021 + 20 | 0.004 + 1 |
| 3 MΩ | 1 Ω | 5 µA | 0.007 + 20 | 0.020 + 20 | 0.021 + 20 | 0.004 + 1 |
| 30 MΩ | 10 Ω | 0.5 µA | 0.06 + 50 | 0.1 + 50 | 0.1 + 50 | 0.030 + 1 |
| 300 MΩ ⁴ | 1 kΩ | 0.5 µA | 2.0 + 5 | 2.0 + 5 | 2.0 + 5 | 0.30 + 1 |

¹For 5 1/2-digit accuracy, divide count error by 10. For 4 1/2-digit accuracy, count error is 5 (except 15 on 300Ω range). For 3 1/2-digit accuracy, count error is 5.

²4-wire accuracy, 3000-30kΩ ranges.

³When properly zeroed.

⁴Resolution on 300MΩ range is limited to 5 1/2 digits.

⁵Relative to calibration standards.

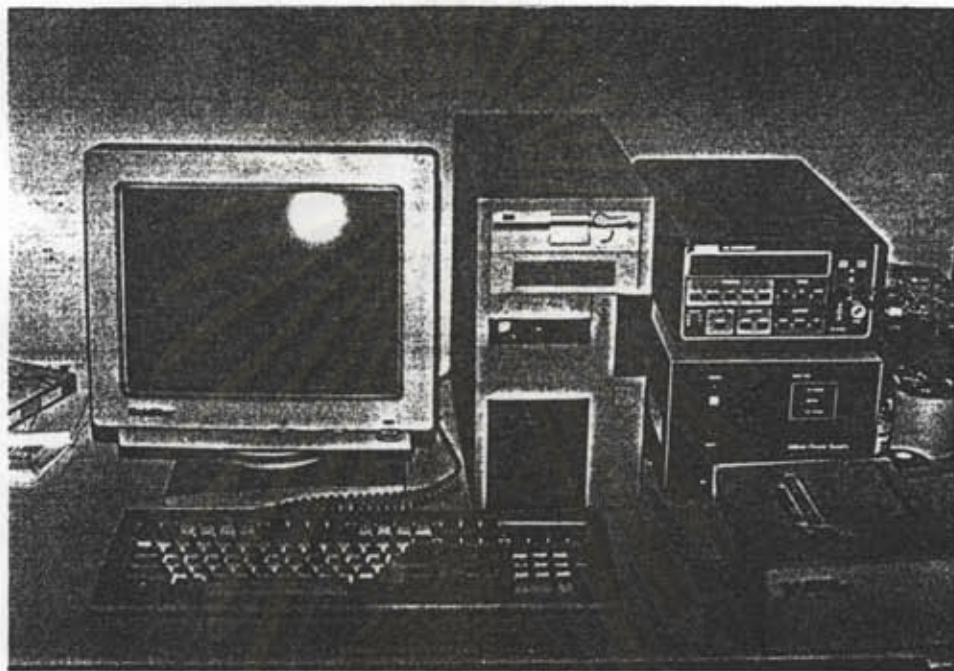
CONFIGURATION: Automatic 2- or 4-wire. Offset compensation available on 3000-30kΩ ranges, requires proper zeroing. Allowable compensation of ± 10mV on 3000 range and ± 100mV on 3kΩ and 30kΩ ranges.

MAX. ALLOWABLE INPUT: 300V rms, 425V peak, whichever is less.

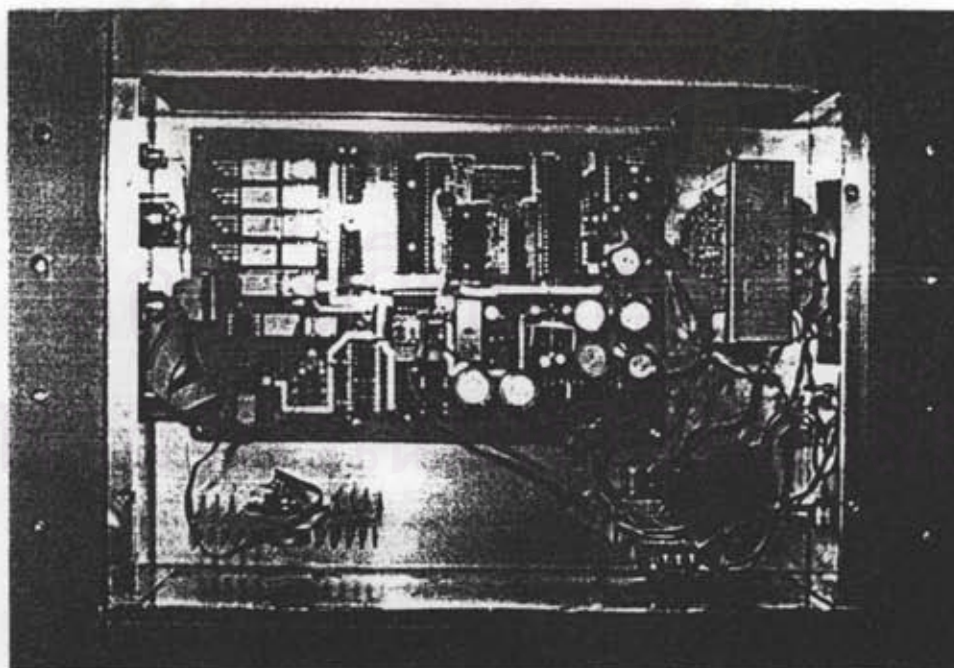
OPEN CIRCUIT VOLTAGE: 5.5V maximum.

LINEARITY: Linearity is defined as the maximum deviation from a straight line between the readings at zero and full range: 20ppm of range for 3000-30kΩ ranges, at 23°C ± 1°C.

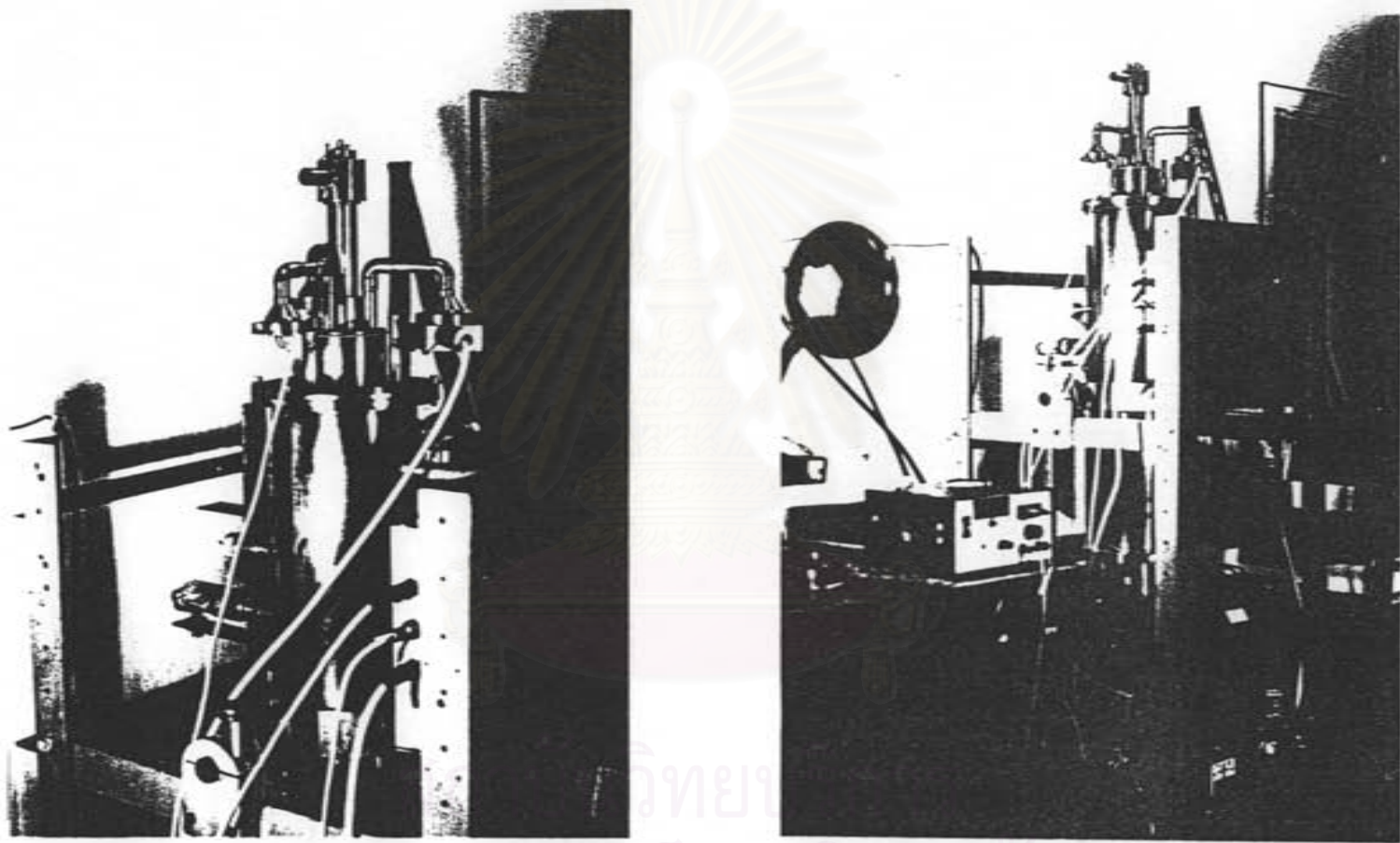
ภาคผนวก ค
ภาพถ่ายระบบวัดส่วนต่างๆ



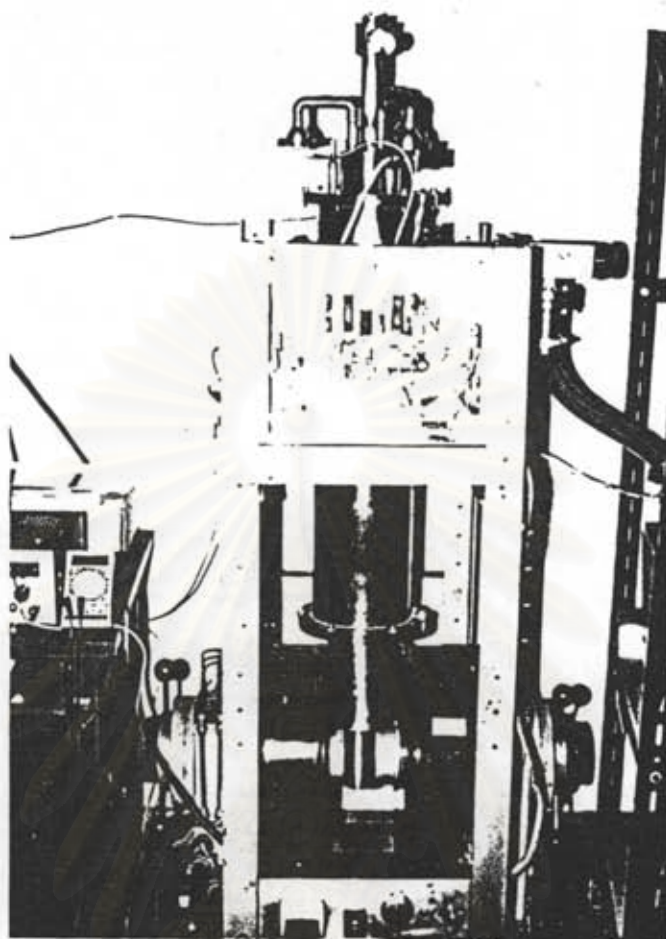
ไมโครคอมพิวเตอร์ และ มัลติมิเตอร์ Kiethley 196



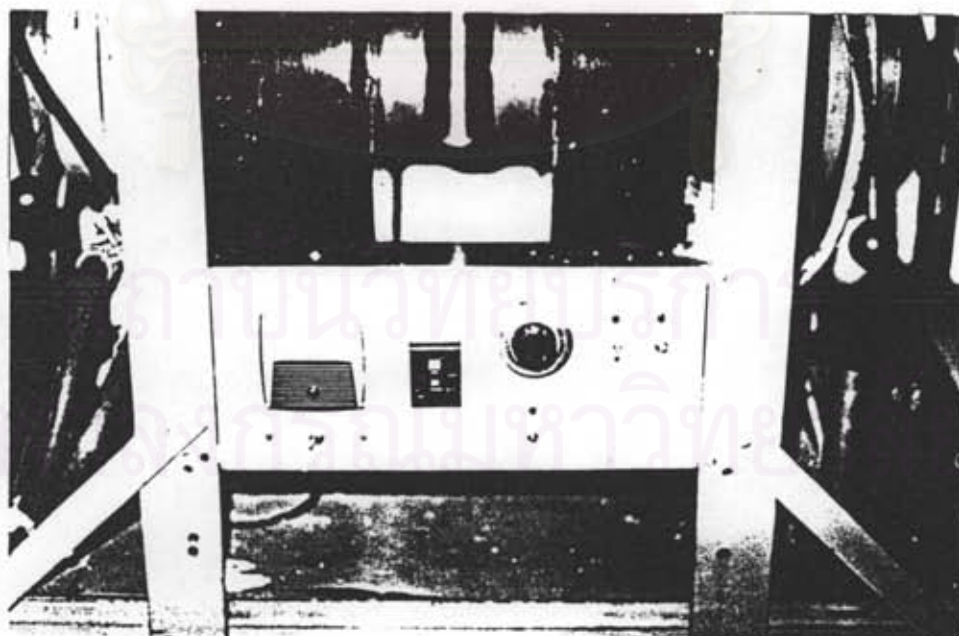
วงจรรวมของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และแหล่งจ่ายกระแสคงที่



ระบบสายสัญญาณและระบบควบคุมอุณหภูมิ



ระบบห้องวัดและระบบแม่เหล็กไฟฟ้า



ระบบควบคุมแม่เหล็กไฟฟ้า



ประวัติผู้เขียน

นายสมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2512 สำเร็จการศึกษา
มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนยุพราชวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อปี พ.ศ. 2530 และ
ได้รับการคัดเลือกให้เป็นนักศึกษาทุนโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความรู้และความสามารถ
พิเศษทางวิทยาศาสตร์ (พสวท.) ศูนย์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสำเร็จการศึกษาปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) เมื่อปี พ.ศ. 2534 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหา
บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยในช่วงท้ายของการ
ศึกษาได้รับทุนช่วยวิจัยในโครงการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจากศูนย์เทคโนโลยี
โลหะและวัสดุแห่งชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย