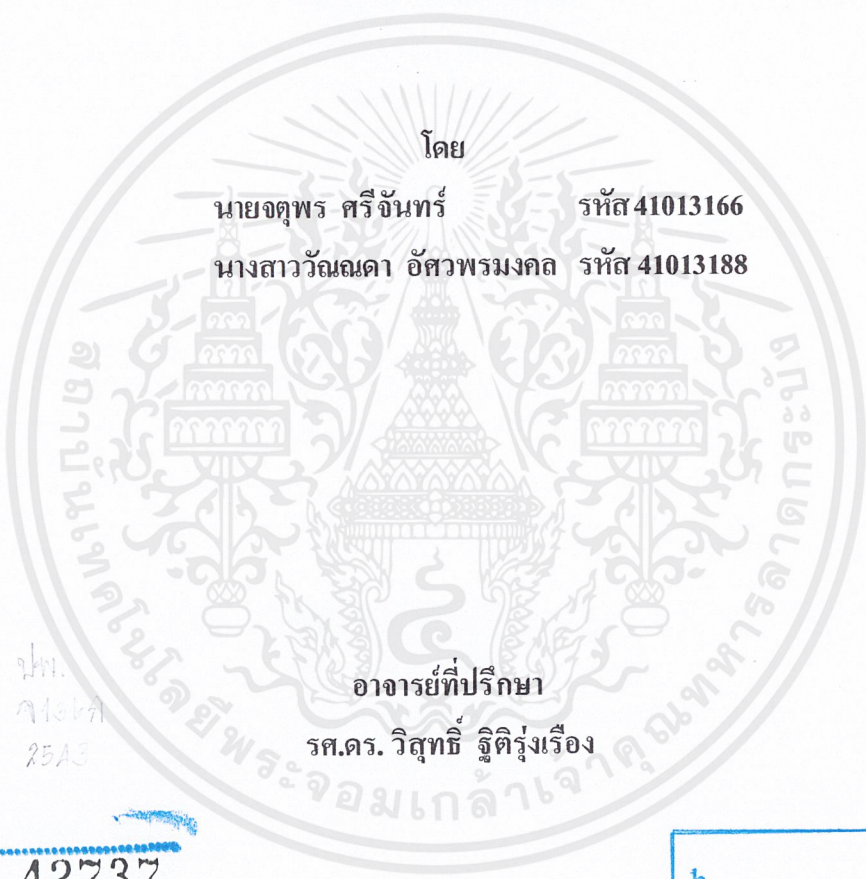


การศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
A STUDY SUPERCONDUCTIVITY MAGNETIC SENSOR



โดย
นายจตุพร ศรีจันทร์ รหัส 41013166
นางสาววิณดา อัสวพรมงคล รหัส 41013188

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

พท.
๗1๖๒๓
2543

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42737
วัน, เดือน, ปี..... 7 ส.ย. 2545

b.....
i.....

ปริญญาโทสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

611215653

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

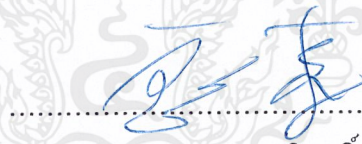
เรื่อง การศึกษาหัวข้อสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ผู้จัดทำ

1. นายจตุพร ศรีจันทร์ รหัส 41013166

2. นางสาววันฉัตร อัสวพรมงคล รหัส 41013188





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. วิสุทธิ วิติรุงเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

นายจตุพร ศรีจันทร์

นางสาววันฉดา อัสวพรมงคล

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการศึกษา คุณสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่จำเป็นต่อการประยุกต์ใช้งาน โดยได้นำเสนอพอสังเขปดังนี้

หัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ตระกูลอิตเทรียม ถูกสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการศึกษาได้ทำการขึ้นรูปหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็น 4 รูปแบบ คือ หัววัดสนามแม่เหล็กหนา 3 มม., 2 มม., 1.5 มม. และ 1 มม. จากผลการศึกษาคงสมบัติทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก พบว่า หัววัดสนามแม่เหล็กแต่ละรูปแบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานต่างกัน ซึ่งหัววัดสนามแม่เหล็กหนา 1 มม. สามารถวัดสนามแม่เหล็กที่ค่าต่ำๆ ได้ดี โดยใช้กระแสไบอัสปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อปริมาณสนามแม่เหล็กค่าสูงๆ จะเหมาะกับสนามแม่เหล็กที่มีความหนา 3 มม. มากกว่า และความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กกับกระแสวิกฤตของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบต่างๆ จะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

A SYUDY SUPERCONDUCTIVITY MAGNATIC SENSORS

Mr.Chathuporn Srichan

MISS.Wannada Aswpronmongkol

ABSTRACT

This thesis presents the study of Superconductivity Magnetic Sensor , including the supplementary study on I-V and magnetic properties of superconductor which is necessary to the applications as following briefly.

The fabrication and measurement method of magnetic sensor were specially developed by Superconductor Laboratory of Electronics Research Center , King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang. The ingredients were tablet – pressed into 4 forms which were thick magnetic sensor 3 mm , 2 mm , 1.5 mm and 1 mm. The I-V and magnetic characteristic showed that thick magnetic sensor 1 mm are the best to measured magnetic field low level. It is found that magnetic field and critical current of magnetic sensor are linear proportional.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จสมบูรณ์ของโครงการในครั้งนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์ของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการให้ความรู้ แนวความคิด การแก้ไขปัญหาและสนับสนุนมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณเดชา ยศศักดิ์ศรี และคุณพัชรินทร์ บุญเร่่งทรัพย์ ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำโครงการชิ้นนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดทุกท่านที่ให้อำลัใจและความช่วยเหลือตลอดมา สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่ให้กำเนิดและให้การสนับสนุนพร้อมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีในด้านการศึกษามาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด	1
1.2 การจัดกลุ่ม Superconductors	3
1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	4
1.3.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์	4
1.3.2 งานด้านระบบกำลัง	5
1.3.3 งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์	6
1.3.4 การคมนาคม	7
1.3.5 การทหาร	7
บทที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	9
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	9
2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	9
2.1.2 ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	10
2.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	11
2.1.4 อุณหภูมิวิกฤต	12
2.1.5 ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	12
2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	13
2.2.1 ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	13
2.2.2 กระแสคงสภาพ	14
2.2.3 ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	15
2.2.4 สนามแม่เหล็กวิกฤต	17
2.2.5 การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	19
บทที่ 3 การทดลอง	21
3.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	21
3.1.1 การเตรียมสารเคมี	21
3.1.2 อุปกรณ์สำหรับผสมและใส่สารที่จะเผา	21
3.1.3 เตาเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง 1,050 องศา	22
3.1.3.1 ตัวเตาเผาของชนิดลดความร้อน	22
3.1.3.2 หัววัดอุณหภูมิเตาเผา	22
3.1.3.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	22
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
3.1.5 การอัดเม็ดสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	25
3.2 การทดสอบการมีสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	26
3.2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์	26
3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	26
3.2.2.1 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	27
3.2.2.2 ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	27
3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	27
3.3.1 ลักษณะการขึ้นรูปของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	27
3.3.2 การสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	28
3.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	28
3.5 ขั้นตอนในการทดลอง	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและแนวทางการประยุกต์	31
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	31
4.1.1 เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กต่อฉนวนชั้นสารตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าความหนาต่างๆ	35
4.2 ผลการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากระแสวิกฤตกับ ค่าสนามแม่เหล็กที่ค่าความหนาต่างๆ	39
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4.4 แนวทางการประยุกต์ใช้งานฉนวนชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็น หัววัดสนามแม่เหล็ก	40
บทที่ 5 บทสรุป ภาคผนวก หนังสืออ้างอิง	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท	2
1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	2
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	3
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ	10
2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	11
2.3 V-I ขณะเกิดปรากฏการณ์ silsbee effect	12
2.4 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	13
2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่างๆ	14
2.6 (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกตัดผ่านวงจรรวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	15
2.6 (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้านและกระแสแสดงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	15
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ	17
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิของธาตุต่างๆ	18
2.9 แบบจำลองของสารเซรามิกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	20
3.1 อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง	21
3.2 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง 1,050 องศา	22
3.3 แผนผังแสดงชุดควบคุมอุณหภูมิของเตา	23
3.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาความร้อนสูง 1,200 องศา	23
3.5 แผนผังขั้นตอนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Yb_a_2Cu_3O_{7-x}$	24
3.6 แผนผังขั้นตอนการเผาเม็ดชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	25
3.7 เครื่องอัดเม็ดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	25
3.8 ผลของการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่ได้จากการทดลอง	26
3.9 วงจรที่ใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	26
3.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก	27
3.11 แสดงชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	28
3.12 แสดงจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	28
3.13 แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงลักษณะของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความหนาต่างๆ	29
3.15 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง	30
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ เมื่อชิ้นสารมีความหนา 3 mm	31
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ เมื่อชิ้นสารมีความหนา 2 mm	32
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ เมื่อชิ้นสารมีความหนา 1.5 mm	33
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ เมื่อชิ้นสารมีความหนา 1 mm	34
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ 0 mT	35
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ 0.3 mT	36
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ 0.5 mT	37
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ 1 mT	38
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับค่าสนามแม่เหล็กที่ ความหนาของชิ้นสารค่าต่างๆ	39

บทที่ 1

บทนำ

โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่าน จะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนเนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตัวนำนั้น ส่วนในเรื่องของสำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด(Superconductor) คือตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทานไฟฟ้าสามารถนำไฟฟ้าปริมาณสูงๆ ได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนดังที่เกิดกับตัวนำธรรมดา

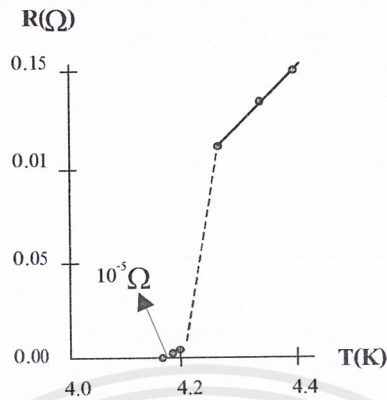
ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีผู้สนใจในการที่จะนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรมของโลกมีความสนใจเพิ่มสูงขึ้น และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยีอย่างมาก

1.1 การค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ช่วงระยะเริ่มต้นของ solid-state physics นักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจอย่างมากในเรื่องความสัมพันธ์ของปริมาณความต้านทานกับอุณหภูมิ Heike Kamerlingh-Onnes นักฟิสิกส์ชาวดัตช์ได้ทำการศึกษาเรื่องนี้ที่อุณหภูมิของฮีเลียม โดยเลือกใช้ปรอทเป็นชิ้นสารในการทดลอง เพราะปรอทนั้นมีความบริสุทธิ์อย่างเพียงพอ

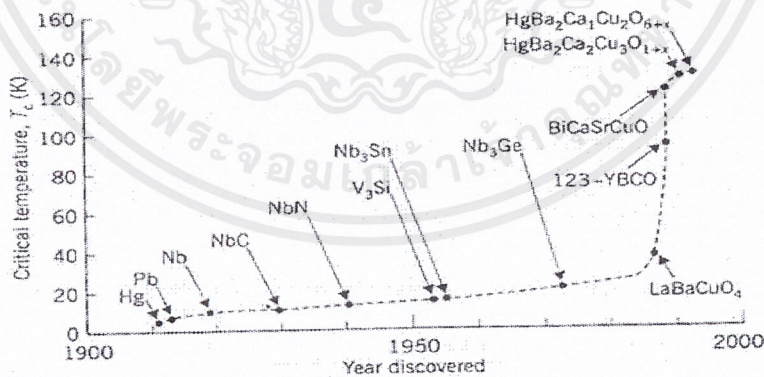
ใน ค.ศ. 1911 Heike Kamerlingh-Onnes ค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษามาสู่ยุคปัจจุบัน เขาได้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ เขาพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 4.2 K หรือเรียกว่า เกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) กับอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes แสดงดังรูปที่ 1.1 นอกจากนี้ Onnes ยังได้พบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะอื่นๆ ทำให้ Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2454

เมื่อนำเอาวงแหวนโลหะที่อยู่ในสถานะตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า ความต้านทานจะหายไปเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนนี้เพิ่มขึ้น และยังคงไหลวนอยู่รอบๆ วงแหวนตลอดไป ดังตัวอย่างการทดลองของ Collins (ค.ศ.1959) ได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าเวลาจะผ่านไปสองปีครึ่งแล้วก็ตาม ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนอยู่บนวงแหวนโลหะนั้น



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes (1911)

จากการค้นพบของ Heike Kamerlingh Onnes ได้ให้มีการศึกษาทดลองตามมาอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใหม่ๆ อีกมากมาย และยังมีการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเหล่านี้ สภาพไร้ความต้านทานนี้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดข้อหนึ่ง แต่ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกเช่น การสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก และอุณหภูมิ



รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

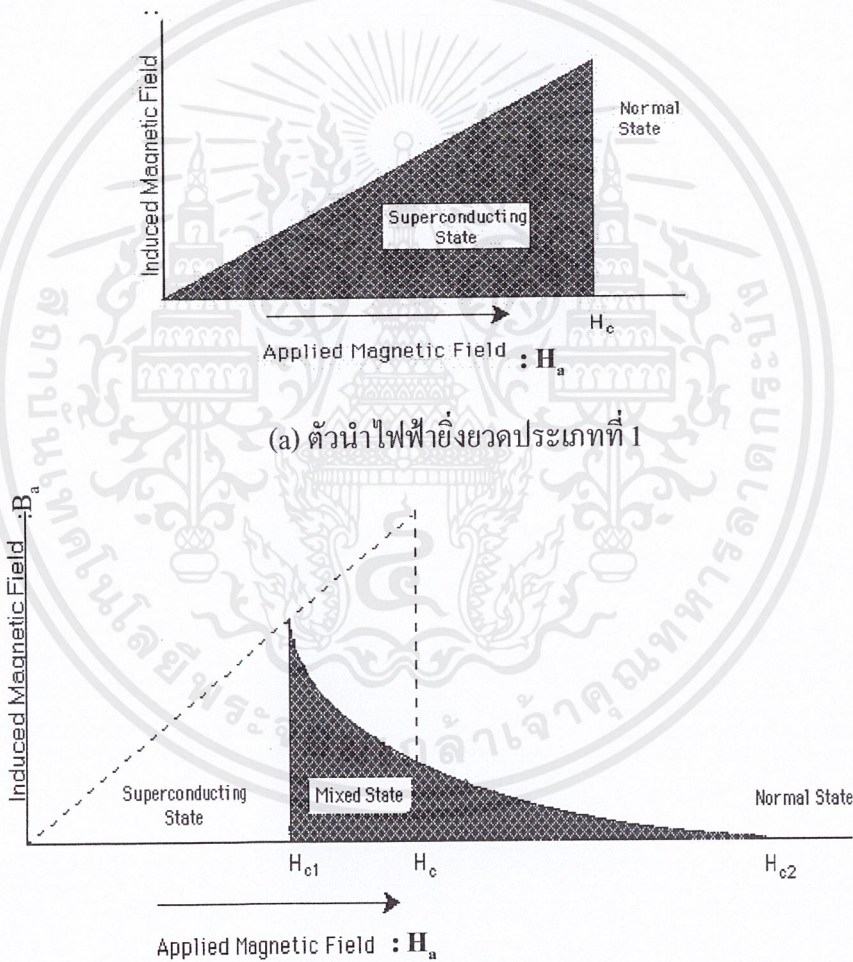
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การจัดกลุ่ม Superconductors

Superconductor แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

(1) Type I : ได้แก่ ธาตุบริสุทธิ์ พวก In, Sn, Tl ให้สนามวิกฤตต่ำ มีช่วงความยาวพร้อมเพียงยาวกว่าความลึกซึมซาบ ($\xi > \lambda$) ซึ่งไม่เหมาะนำมาประยุกต์ใช้งาน

(2) Type II : ได้แก่ โลหะพวก Alloys, Ceramics ที่ได้จากการผสมผสานต่างๆ เข้าด้วยกัน (ธาตุผสม) มีช่วงความยาวพร้อมเพียงสั้นกว่าความลึกซึมซาบ ($\xi < \lambda$) จะให้สนามวิกฤตจาก H_{c1} ที่กว้างกว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1] (a) ประเภทที่ 1 (b) ประเภทที่ 2

ในการศึกษาวิจัยพบว่าสารกลุ่ม Ceramic (ซึ่งมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอุณหภูมิห้องได้ไม่ดี) สามารถนำมาสร้างเป็น Superconductor ได้ดีกว่าพวกโลหะ (ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในอุณหภูมิห้องได้ดี)

1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยุคนั้นมีความสามารถเหนือกว่าตัวนำธรรมดา 3 ข้อ ได้แก่

- (1) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่มีความต้านทานไฟฟ้าหรือความต้านทานเป็นศูนย์
- (2) ไม่มีผลของความร้อนเนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย
- (3) ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านทะลุ โดยจะประพุดิตัวเหมือนกับ ไดอะแมกเนต

(diamagnet)

ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้รับความสนใจอย่างยิ่งในการที่จะประยุกต์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงมาใช้ทางด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของทางด้านอิเล็กทรอนิกส์น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาก เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะพวกวงจรรวม ซึ่งมักจะเป็นวงจรสำเร็จในตัวเดียวซึ่งได้เปรียบในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ใหญ่ๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวม นั้นซับซ้อนทั้งเรื่องกลดตายและการได้ชิพที่ทำการบรรจุลงตัวถึง การต่อขาโดยใช้ลวดโลหะเชื่อมต่อกับวงจรรวมภายนอก ความร้อนนับเป็นสิ่งสำคัญต่อวงจรรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรรวมที่มีรายละเอียดมากๆ ความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรรวมขณะทำงาน ดังนั้นในการออกแบบวงจรรวม จึงต้องมีการเว้นระยะห่างของตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีที่พอที่จะกระจายความร้อน ทำให้ต้องสูญเสียพื้นที่ในส่วนนี้ไป แต่ในกรณีที่น่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ในวงจรรวมจะไม่เกิดปัญหาของความร้อน ตัวอุปกรณ์ในวงจรรวมจึงสามารถออกแบบให้อยู่ใกล้กันได้มาก ซึ่งในกรณีนี้ยังช่วยลดเวลาของการส่งผ่านสัญญาณอีกด้วยและชิพจะมีขนาดเล็กลงอีกด้วย

การใช้งานอีกแบบหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในงานอิเล็กทรอนิกส์ คือ รอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในลักษณะของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่สามารถทำงานเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ได้เป็นร้อยเท่า ถ้านำมาใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมากขณะที่ขนาดเล็กลงอีก รอยต่อโจเซฟสันนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2505 โดย Brian Josephson รอยต่อโจ

เซฟสันประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ยาวสองส่วนที่ถูกแยกด้วยชั้นกั้นฉนวนบางๆ เราใช้การเปลี่ยนแปลงระดับของกระแสในกรณีที่ใช้รอยต่อโจเซฟสันเป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิทช์ โดยรอยต่อโจเซฟสันมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

(1) ความเร็วในการสวิทช์จาก Zero Resistance ไปเป็น Positive Resistance ประมาณ $1/10^{12}$ ของวินาที

(2) สามารถควบคุมด้วยอุปกรณ์กำลังต่ำๆ ได้ เพราะเป็นการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กและตัวรอยต่อเองมีการสูญเสียกำลังต่ำมากๆ

(3) สามารถนำไปเป็นหน่วยความจำของระบบการประมวลผลต่างๆ ได้ เพราะคุณสมบัติที่

- ไม่มี Voltage ตกรวม Function เมื่อเป็นสภาพตัวนำยิ่งยวด

- มี Voltage ตกรวม Function เมื่อเสียสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปัจจุบันได้มีการนำไปทดลองใช้เป็นวงจร OR, AND gate โดยสร้างเป็น Array of Josephson Cell ที่ Data ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กและนำไปสร้าง Oscilloscopes ทำให้มี Bandwidth สูง เช่น เครื่อง PSP-750 Oscilloscope ที่มี Bandwidth 70 GHz, $50\mu\text{V}$ Sensitivity ของบริษัท Hypres Inc, NEW YORK, 1987 เพื่อใช้ในงานด้านความถี่ Microwave

1.3.2 งานด้านระบบกำลัง

ระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งเริ่มจากเครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่ภาคจ่ายกำลังผ่านเครือข่ายไปสู่ผู้บริโภคนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายและพลังงานได้มากเมื่อใช้สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแทนระบบทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่

เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ให้กระแสเท่ากับที่ให้นำธรรมดา จะทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่ากระแสที่ผลิตได้จะถูกจ่ายออกไปตามโครงข่ายที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหลัก ทำให้ความสิ้นเปลืองลดลงจากระบบทำงานปกติซึ่งจะต้องสูญเสียไปประมาณ 20% ของไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้น

เมื่อพลังงานไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นมาครั้งๆ หนึ่ง จะถูกส่งไปยังผู้บริโภคเท่าที่มันผลิตได้เป็นส่วนมาก เนื่องจากปัจจุบันไม่มีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานจำนวนมากจึงจำเป็นต้องมีการประมาณว่าผู้บริโภคจะใช้ปริมาณเท่าใด และปรับการผลิตให้เหมาะสมกับความต้องการตามการคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีที่ผู้บริโภคต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าปกติจะมีพลังงานบางส่วนเหลือการใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อลดการสูญเสียไปได้ Omnes ที่ได้เห็นยวนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ลดลงเลยเมื่อเวลาผ่านไป เราจึงสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ยาวนาน ระบบ SMES จะถูกต่ออยู่กับโครง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขายกำลัง ในช่วงเวลาที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีจำนวนน้อย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกนำเข้าสู่ อุปกรณ์ SMES และในระหว่างที่ปริมาณไฟฟ้ามีความต้องการอย่างมาก กระแสไฟฟ้าที่อยู่ใน ระบบ SMES ก็จะกลับเข้าสู่ระบบกำลัง

ประโยชน์ของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเก็บ และการกระจายพลังงานเท่านั้น สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังมีประโยชน์ในการพัฒนาระบบและ อุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน และ เครื่องเป่าผม ในวันหนึ่งข้างหน้า อาจจะสร้างด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งใช้พลังงานน้อยลง และมีขนาดเล็กมาก

1.3.3 งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์

สาขาวิทยาศาสตร์ และการแพทย์จะได้รับผลดีอย่างมากจากสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรง และการตรวจจับสนามแม่เหล็ก อ่อนๆ

นักฟิสิกส์นั้นได้ใช้ประโยชน์ของแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมานานแล้วสำหรับใช้ กำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรงเพื่อศึกษาการชนของอะตอม ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์นักฟิสิกส์ ได้พยายามสร้าง magnetic bottle เพื่อเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่น โดยใช้แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยหวังว่าในอนาคตอันใกล้นี้จะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่สามารถเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่น ได้

สควิดส์ (SQUIDS) เป็นชื่อย่อของ Superconduction Quantum Interference Device สควิดส์ ประกอบด้วยรอยต่อโจเซฟสันเป็นชั้นแบบเซนวิซของฉนวนชั้นบางได้ตามขบวนการที่เรียกว่า Tunneling ถ้าสควิดส์นี้ถูกวางไว้ในสนามแม่เหล็ก แรงดันของกระแสที่มีการไหลผ่านตัวมัน จะเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก สควิดส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงสำหรับการวัด ค่าสนามแม่เหล็ก สควิดส์จึงมักถูกอ้างอิงถึงบ่อยๆ เช่น ในแมกนีโตมิเตอร์ (magnetometer)

เครื่องมือสร้างภาพอวัยวะภายในร่างกาย

ในทางการแพทย์สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกนำมาใช้ในเครื่องมือสร้างภาพ ได้แก่ เครื่อง NMR (Nuclear Magnetic Resonance) หรือ MRI (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่งสามารถสร้าง รายละเอียดของอวัยวะภายในภาพของ MRI คล้ายกับ CAT (Computerized Axial Tomography Scanning) เป็นระบบที่ใช้ข้อมูลจากรังสีเอ็กซ์ในหลายๆ มุม แต่ CAT ไม่มีความไวต่อเนื้อเยื่ออ่อน และต้องใช้การแผ่รังสีซึ่งมีอันตรายต่อร่างกาย ส่วน MRI นั้นมีความไวสูงมากกับเนื้อเยื่ออ่อน และไม่ต้องผ่านการแผ่รังสีเพราะ ใช้สนามแม่เหล็กแรงๆ ที่สร้างขึ้นโดยขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลักการของ MRI

เมื่อร่างกายของคนถูกฉายด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โปรตรอนในน้ำและอนุภาคอื่นๆ จะเรียงตัวให้มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก จากนั้นจะป้อนพลังงานความถี่วิทยุที่ความถี่รีโซแนนซ์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้โปรตรอนถูกกระตุ้น เมื่อลดการป้อนพลังงานลง โปรตรอนจะกลับมายังสถานะเดิม และคายพลังงานออกมาพลังงานนี้จะถูกตรวจจับ และประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แล้วนำมาสร้างภาพ อุปกรณ์ MRI ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกจากนี้ MRI ยังสามารถใช้เป็นเครื่องวัดการไหลของเลือดในบริเวณศีรษะและคอ โดยไม่มีผลกระทบต่อคนไข้ ทำให้สะดวกในการวินิจฉัยโลกที่เกี่ยวกับเส้นโลหิตในสมองและระบบประสาท การใช้ MRI ร่วมกับการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อตรวจเนื้อเยื่อหัวใจ เพื่อรักษาผู้ป่วยโรคหัวใจ

1.3.4 การคมนาคม

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้กับการคมนาคมได้หลายทาง แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถใช้กับรถไฟพิเศษที่วิ่งเหนือรางสามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วมาก มอเตอร์ตัวนำไฟฟ้าก็จะถูกนำไปใช้ในเรือและเรือดำน้ำ

รถไฟแมกเลฟ (Maglev Trains) เป็นรถไฟที่มีความเร็วสูงมาก มักจะลอยเหนือรางประมาณ 4 นิ้ว บนเบาะรองแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่มีความเสียดทานที่ล่อมาจำกัดความเร็ว รถไฟแมกเลฟใช้กฎแม่เหล็กธรรมดา คือ ขั้วของแม่เหล็กเหมือนกันผลักกันระบบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบแม่เหล็กส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เพื่อยกตัวรถไฟ และอีกส่วนถูกใช้เพื่อการขับเคลื่อนตามทิศทางที่ต้องการ ในรถไฟแมกเลฟของญี่ปุ่นนั้นได้ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดอุปกรณ์ทำความเย็นที่หนักมากนี้ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงระยะหลังนี้ใช้ระบบทำความเย็นจากไนโตรเจนเหลวก็พอเพียงแต่มันก็ยังมีปัญหาด้านคุณสมบัติบางอย่างที่จำกัด

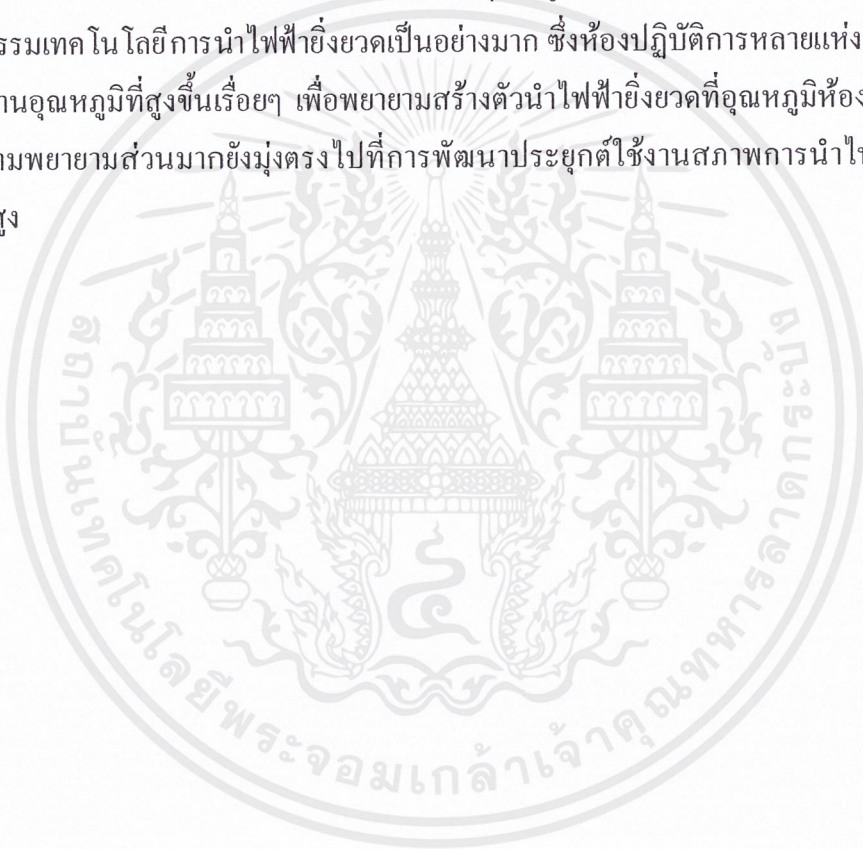
1.3.5 การทหาร

การใช้ประโยชน์ในด้านการทหารก็เกี่ยวข้องกับหลักการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วงานวิจัยในด้านการทหาร ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถนำไปใช้ได้บนเรือรบทหาร และเรือดำน้ำ เรือขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ซึ่งมีส่วนประกอบของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำได้เคยถูกสร้างขึ้นทดสอบเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

Rial Guns หรือตัวขีปนาวุธ ใช้เพื่อเร่งกระสุนปืนใหญ่เพื่อให้มีความเร็วสูงมาก หลักการง่ายๆ คือ กระสุนจะถูกเร่งอย่างทันทีมาตามทางที่ใช้วงแหวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Rial Guns นี้จะถูกนำไปติดตั้งบนรถถังหรือเรือ นอกจากนี้ก็ยังมี Lasers และอุปกรณ์จำพวกตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความสำคัญ

มากสามารถถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและนับว่าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีปัจจุบัน ปัจจุบันสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการค้นคว้าและค้นพบขยายวงกว้างออกไปทั่วโลกขณะที่นักวิทยาศาสตร์เร่งการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ค้นพบได้ใหม่ๆ ในแต่ละวันวิศวกรก็กำลังพยายามเปิดช่องทางเข้าสู่เทคโนโลยีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อการใช้งาน บริษัทเอกชนต่างๆ กำลังมองหาโอกาสและช่องทางการค้าที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นการแข่งขันระหว่างห้องปฏิบัติการบริษัทและนักวิจัยจึงเพิ่มมากขึ้น

การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อให้ใช้ได้ที่อุณหภูมิห้องจะเป็นสิ่งที่จำเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมเทคโนโลยีการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นอย่างมาก ซึ่งห้องปฏิบัติการหลายแห่งกำลังศึกษาและรายงานอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อพยายามสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจริงๆ นอกจากนี้ความพยายามส่วนมากยังมุ่งตรงไปที่การพัฒนาประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง



บทที่ 2

คุณสมบัติและหลักการของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity)

การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะคงสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ต้องอยู่ภายใต้คุณสมบัติ 3 ประการดังต่อไปนี้

1. กระแสที่ป้อนให้เพื่อการ Bias ให้ทำงานต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

$$I_a \leq I_c \quad (2.1)$$

โดย I_c คือค่ากระแส Bias สูงสุดที่ถูกทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวด ให้กลายเป็นตัวนำธรรมดา

2. สนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับ Superconductor ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field)

$$H_a \leq H_c \quad (2.2)$$

โดย H_c คือค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เริ่มจะทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวด

3. อุณหภูมิที่ใช้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

โดย T_c คือค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เริ่มจะทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวด การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถทำได้โดยให้

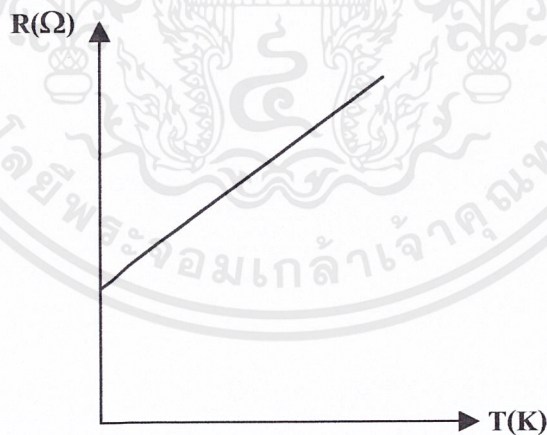
$$I_a \leq I_c \quad (2.3)$$

$$H_a \leq H_c \quad (2.4)$$

$$T_a > T_c \quad (2.5)$$

2.1.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance)

ความต้านทานไฟฟ้ามีการลดลงเมื่อโลหะหรือ Alloy ถูกทำให้เย็นลง เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความสั้นสะท้อนของอะตอมจะลดลง และการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจะน้อยกว่าค่าความถี่ของการเคลื่อนที่ที่มีการกระจัดกระจาย ความต้านทานมีการลดลงเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิให้มีค่าประมาณหนึ่งในสามตามคุณลักษณะของอุณหภูมิ (Debye temperature) ของวัสดุแต่ความต้านทานที่ลดลงรวดเร็วอย่างต่อเนื่องนี้ยังน้อยกว่าการลดลงของอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด (ตามรูปที่ 2.1) สำหรับโลหะบริสุทธิ์นั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะถูกต่อต้านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างและความต้านทานจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิลดลงเป็นศูนย์ได้ถูกสมมติให้เป็นตัวนำที่สมบูรณ์ เมื่อถูกทำให้เย็นลงจนถึงค่าอุณหภูมิศูนย์สมบูรณ์ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชิ้นสารของโลหะอื่นๆ ไม่สามารถทำให้บริสุทธิ์อย่างสมบูรณ์ได้ แม้จะมีสิ่งเจือปนอยู่บ้าง ดังนั้นอิเล็กตรอนซึ่งจะเคลื่อนที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอะตอมจะเคลื่อนที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะมากกว่าหรือน้อยกว่าเดิมขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิ จากเหตุผลนี้จึงมี "สภาพความต้านทานคงค้าง (residual resistivity)" ซึ่งยังคงเหลืออยู่แม้จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำที่สุด โลหะที่มีความบริสุทธิ์น้อยมากขึ้นเท่าใดก็จะมีสภาพความต้านทานคงค้างมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ

โลหะจะมีคุณสมบัตินี้เห็นได้ชัดเมื่อมันถูกทำให้เย็นลง ความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงตามปกติ แต่ถ้าอยู่ที่อุณหภูมิ 2-3 องศาเหนืออุณหภูมิศูนย์สมบูรณ์แล้วมันจะสูญเสียความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดในทันที กล่าวได้ว่ามันจะอยู่ในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเกิดขึ้นแม้ว่าโลหะจะไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับความต้านทานคงค้างขนาดใหญ่

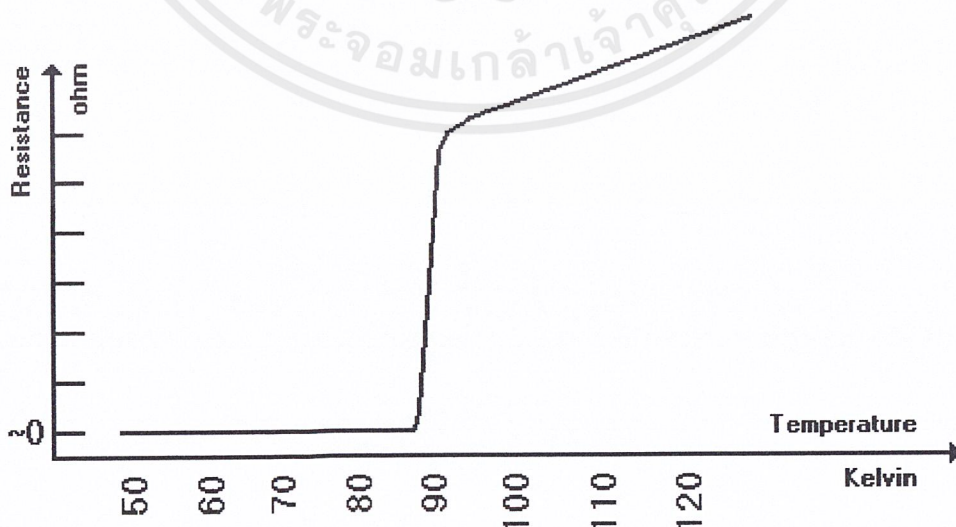
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

(Superconduction Transition Temperature)

อุณหภูมิที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสูญเสียความต้านทานนี้ เรียกว่า สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือ อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature : T_c) อุณหภูมินี้จะมีความแตกต่างในโลหะแต่ละชนิด โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลกระทบต่อสารเจือที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าสารเจือที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงก็ตาม ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของโลหะบางชนิดอยู่ในสถานะที่มีความบริสุทธิ์จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำมากและอาจถูกทำลายโดยปริมาณของสารเจือแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย ดังนั้นธาตุเหล่านี้จะเป็นเพียงการยับยั้งสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้ามีความบริสุทธิ์อย่างมากและชั้นสารของโลหะตัวนำธรรมดาเหล่านี้ที่เป็นทางการค้าจะไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โลหะบริสุทธิ์ไม่ทั้งหมดที่จะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะไม่แสดงสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้ลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เคยได้รับความเย็นมาก่อน

สำหรับสาร alloys จะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แม้ว่าส่วนประกอบของมันจะประกอบด้วยโลหะ ซึ่งโดยตัวของโลหะเหล่านี้เองไม่ได้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถแสดงได้โดยตัวนำที่ไม่ใช่โลหะ สำหรับสารที่อยู่ในสภาพที่ได้รับความเย็นที่มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะเกิดขึ้นถ้าชั้นสารตัวอย่างนั้นบริสุทธิ์และมีสภาพสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้นสาร ไม่บริสุทธิ์หรือ โครงสร้างผลึกถูกรบกวนจะทำให้การเปลี่ยนสภาพอาจจะกว้างมากขึ้นได้



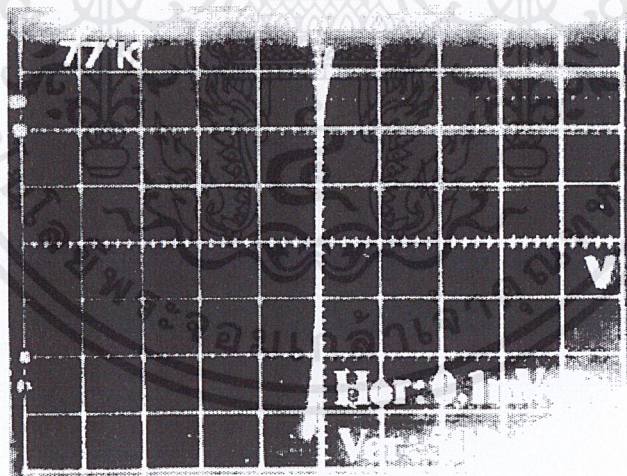
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1] ชนิดการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

จากการที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความต้านทานลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิวิกฤตนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและมีค่าคงที่ เช่น โลหะที่มีความบริสุทธิ์นั้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่ำมากเมื่อเติมสารเจือทางแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยจะทำให้ อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก อุณหภูมิวิกฤตนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ดีขึ้นเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานและคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถยอมรับได้ สามารถนำไปพิจารณาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้อีกมากมาย

2.1.5 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect)

ปรากฏการณ์ซิลสบี คือ ปรากฏการณ์ทำลายสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยกระแสที่ผ่านเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤตทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกลายเป็นตัวนำธรรมดา



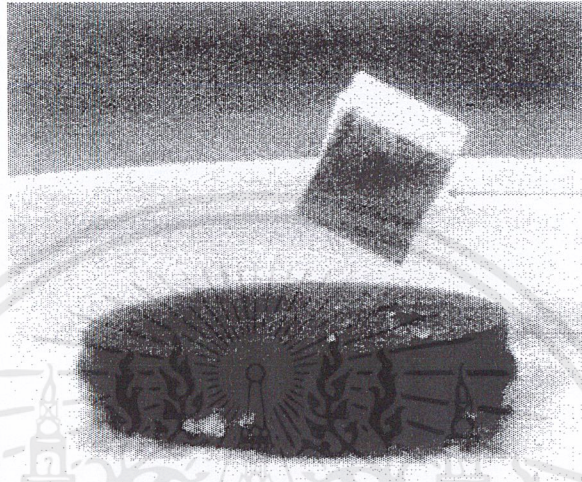
รูปที่ 2.3 V-I ขณะเกิดปรากฏการณ์ silsbee effect

จากรูปแสดงเส้นกราฟในจอของออสซิลโลสโคปจะอยู่ในแกน Y จากนั้นค่อยเพิ่มกระแสให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีก สังเกตเส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มถูกทำลาย ดังรูปค่ากระแสสูงสุดที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเรียกว่า กระแสวิกฤต(I_c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

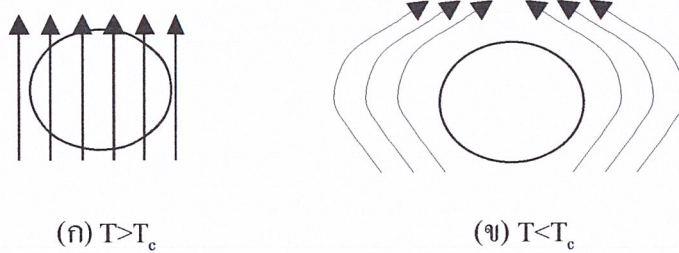
2.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)



รูปที่ 2.4 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ เป็นคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กที่สำคัญอย่างมากในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพราะใช้ทดสอบการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอย่างง่าย ๆ จากการทำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่มีความต้านทานทางไฟฟ้าทำให้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะไม่เกิดแรงดัน และไม่เกิดการสูญเสียทางความร้อนภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีไฟฟ้าแม่จะป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอก สนามแม่เหล็กที่เคยอยู่ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่มีเปลี่ยนแปลงใดๆ จากรูปที่ 2.5(a) เมื่อนำวัสดุทรงกลม (ยังไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด) อยู่ในอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แล้ววัสดุทรงกลมนั้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา เส้นแรงแม่เหล็กจึงสามารถซึมทะลุผ่านเข้าไปในทรงกลมได้ จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิของทรงกลมให้ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตจนทำให้วัสดุทรงกลมนี้มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะต้องเป็นศูนย์เสมอและไม่ขึ้นกับขั้นตอนการลดอุณหภูมิหรือการป้อนสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ トラบโดที่อุณหภูมิมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิวิกฤต เส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องมีลักษณะในรูป 2.5(b) เสมอ ผลที่เกิดขึ้นลักษณะนี้ทำให้ทราบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่เพียงแต่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ (Perfect Conductor) เท่านั้นแต่ในขณะที่เดียวกันก็เป็นแม่เหล็กได้ออย่างสมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) ด้วย ซึ่งไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมซาบเข้าไปภายใน คุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กได้ออย่างสมบูรณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อ (a) อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (b) อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต [1]

2.2.2 กระแสคงสภาพ (PERSISTENT CURRENT)

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กอ่อนนั้น จะประพฤติตัวเหมือนสารแม่เหล็ก diamagnetic กล่าวคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้านเพื่อหักล้างสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎหมายของ Lenz's law ซึ่งสนามแม่เหล็กนั้นจะไม่ไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ทำให้สนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์ โดยจะผลักความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันที เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)"

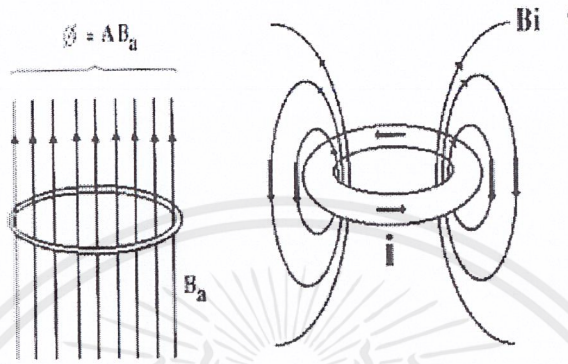
จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นมีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำจะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพ (persistent current) ไหลวนอยู่ในผิวของชิ้นสาร กระแส (I) ซึ่งไหลต่อเนื่องกันที่ผิวที่เป็นวงจรมปิด จากการพิจารณาถึงโครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวงแหวน ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่อมีฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก $\Phi = AB_s$ ตามรูปที่ 2.6 (ก) จะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพไหลวนอยู่รอบวงแหวนในทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์ของแม่เหล็ก (B_s) ในวงแหวนเพิ่มขึ้น ที่ทำให้มีการหักล้างฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอก (B_{ext}) ขณะที่สนามเปลี่ยนแปลงจะได้ว่า

$$EMF = -A(dB_s/dt) = Ri + L(di/dt) \quad (2.6)$$

เมื่อ R และ L เป็นความต้านทานรวม และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรในสภาพความต้านทานปกติจะมีการนำกระแสอย่างรวดเร็วจนจะค่อยๆ ลดไปซึ่งฟลักซ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในวงแหวนจะเปลี่ยนเป็นค่าใหม่ซึ่งในสภาพของวงจรที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น สภาพความต้านทานจะเป็นศูนย์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Li + Ab_a = \text{const} \quad (2.8)$$



(ก) พื้นที่หน้าตัด (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก

รูปที่ 2.6 (ก) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกตัดผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

(ข) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้านและกระแสดังกล่าวในวงแหวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

จากสมการที่ 2.8 นี้พบว่าเป็นผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าเส้นแรงฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดนั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีการเหนี่ยวนำกระแสให้หมุนเป็นวงกลม ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (Bi) ที่ภายในชิ้นส่วนนั้นมีความเท่าเทียมกันในทุกพื้นที่และมีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะกระจายออกไปอยู่ที่ผิวภายนอกของเนื้อสารตามรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งเป็นตัวนำไปสู่การป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กภายนอกไม่ให้เข้าไปในเนื้อสาร ผลดังกล่าวนี้เป็นผลของ perfect diamagnetic ของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

2.2.3 ปรัชญาการณ์กระแสดังกล่าวในตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

(PERSISTENT CURRENT EFFECT)

พิจารณารูปวงแหวนถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงแหวนนั้น โดยเป็นไปตามกฎของเลนซ์ (Len's law) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$-A(dB/dt) = RI + L(di/dt) \quad (2.9)$$

โดยที่ R แทนค่าความต้านทานของวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L แทนค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวน

A แทนพื้นที่หน้าตัดภายในวงแหวน

สมการที่ 2.9 ยังคงเป็นจริงในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$0 = RI + L(di/dt) \quad (2.10)$$

ถ้าให้ (I_0) แทนค่ากระแสเริ่มต้นจะได้ว่า

$$I = I_0 \exp(-Rt/L) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลวนในวงแหวนจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล แต่ถ้าวางแหวนเกิดสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวคทีที่มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ สมการที่ 2.11 จะเขียนได้เป็น

$$I = I_0 \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงแหวนจะคงที่ตลอดเวลา เรียกว่า กระแสคงสภาพ (persistent current) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงแหวนจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ LI ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกด้วย ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านในวงแหวนจะเป็น

$$\Phi = AB + LI \quad (2.13)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2.13 จะได้เป็น

$$(d\Phi/dt) = -A(dB/dt) + L(di/dt) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.14

$$(d\Phi/dt) = -RI \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

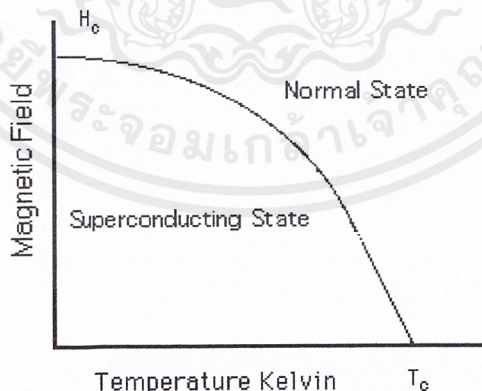
2.2.4 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c)

จากการผ่านสนามแม่เหล็กไปยังตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า สนามแม่เหล็ก สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้กลายเป็นสภาพปกติ (Normal State) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้พอดีนั้นจะเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c) และพบว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้จากสมการ

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2] \tag{2.16}$$

- เมื่อ H_c = สนามแม่เหล็กวิกฤต
- H_0 = สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน
- T = อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต
- T_c = อุณหภูมิวิกฤต

ด้วยเหตุนี้เองค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจึงถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะให้ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมินั้น ๆ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ [1]

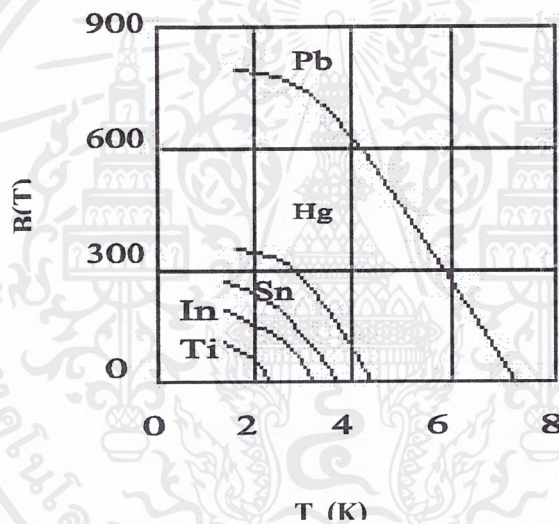
จากรูปที่ 2.7 ถ้าโลหะมีค่าสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิที่สอดคล้องกันอยู่ภายใต้เส้นแผนภาพเฟส (Phase Diagram) โลหะนั้นยังคงสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ แต่ถ้าต้องการให้กลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปสู่สภาพปกติก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กหรือเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มทั้งสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิพร้อมๆ กันได้

2.2.5 การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่งคือ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า T_C และอีกวิธีหนึ่งก็คือ เพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปมากๆ จนกระทั่งมากกว่าสนามวิกฤต $H_C(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ที่อุณหภูมิวิกฤต(T_C) ค่าของสนามวิกฤตเป็นศูนย์คือ $H_C(T_C) = 0$ ความสัมพันธ์ของสนามวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.8 มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ

เมื่อ $T < T_c$ สนามภายนอก $H_a = 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

$T < T_c$ สนามภายนอก $H_a > H_c > 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

$T < T_c$ สนามภายนอก $H_a > H_c$ เป็นสภาวะปกติ คือการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $T = T_c$ ถ้าให้สภาพแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แต่ถ้า $T \ll T_c$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กมากๆ สำหรับ $T = T_c$ ได้ $H_c = 0$ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต สามารถเขียนเป็น

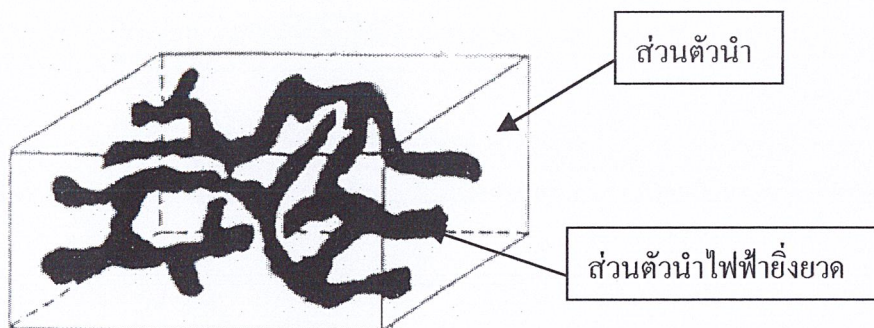
$$H_c(T) = H_c(0)[1 - (T/T_c)^2] \quad (2.17)$$

ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะให้ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มากจนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิ และให้สนามแม่เหล็กค่าสูงๆ สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว เราอาจจะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อีกด้วยกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากๆ จนมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมากกว่าสนามวิกฤตก็จะทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect)

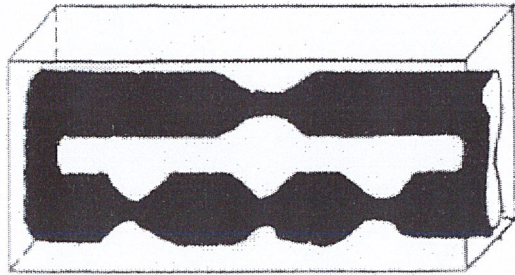
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงได้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของสารเซรามิก ดังนั้น สารดังกล่าวจึงประกอบไปด้วยส่วนสองส่วน กล่าวคือ ส่วนตัวนำไฟฟ้าปกติ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งส่วนที่ไม่ใช่สีดำหมายถึงส่วนตัวนำไฟฟ้าปกติ และส่วนสีดำคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งมีลักษณะที่ซับซ้อน และต่อเนื่องกันทั้งชิ้นสารแต่อาจจะมีลักษณะเส้นทางนำไฟฟ้าที่กว้างและแคบ โดยส่วนที่แคบจะถูกพิจารณาเป็นบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกันอย่างหลวมหรือส่วนคอด หรืออีกนัยหนึ่งคือ บริเวณที่ตัดออกเป็นส่วนแรก เมื่อสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมเช่น การไบอัสกระแสปริมาณมาก และการมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ สามารถเขียนแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.9 (ข) โดยคิดว่าส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกวางตัวในแนวขนานและที่ปลายทั้งสองด้านของชิ้นสารถูกนำมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นเหตุผลให้แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์เมื่อมีกระแสไบอัสชิ้นสารค่าน้อยๆ



(ก) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) แบบจำลองอย่างง่าย

รูปที่ 2.9 แบบจำลองของสารเซรามิกนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 กระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $Yb_a_2Cu_3O_{7-x}$

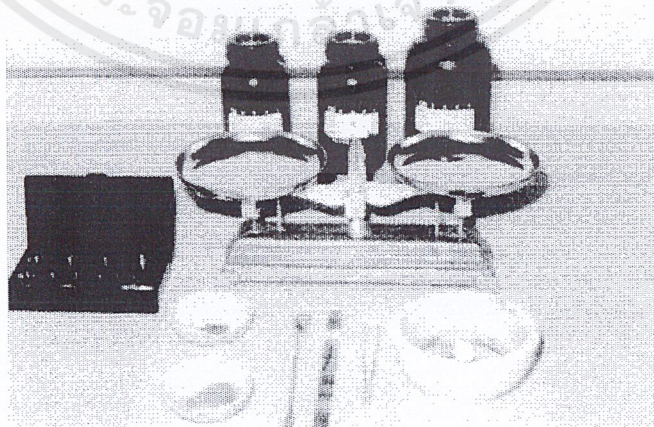
3.1.1 การเตรียมสารเคมี

สามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์ทริยมออกไซด์ (Y_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99 % แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.99 % ,คอปเปอร์ออกไซด์(CuO) ความบริสุทธิ์ 99.99 % นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกัน โดยมีอัตราส่วนของธาตุ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งสามารถสร้างเป็นสารประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $Yb_a_2Cu_3O_{7-x}$ ที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับผสมและใส่สารที่จะเผา

- (1) เครื่องชั่ง 2 แขน
- (2) ครกบดสาร
- (3) ถ้วยเผาทนความร้อน
- (4) ช้อนตักสาร และกระดาษพาราฟิล
- (5) อุปกรณ์จำเป็นอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์สำหรับล้างทำความสะอาดที่กระดาษ

ฟรอยด์ กระเบื้องเซรามิกทนความร้อน เป็นต้น



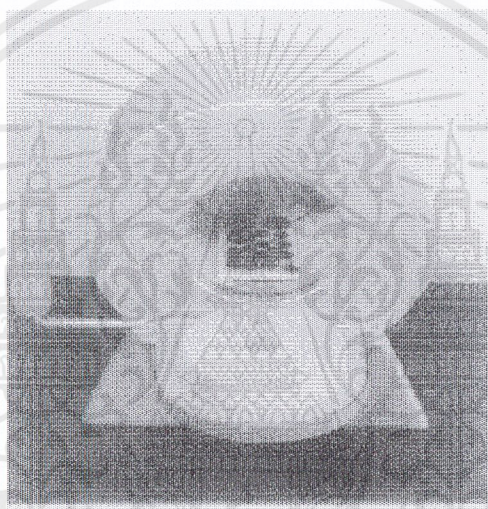
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เตาเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง 1,050 องศาเซลเซียส

ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

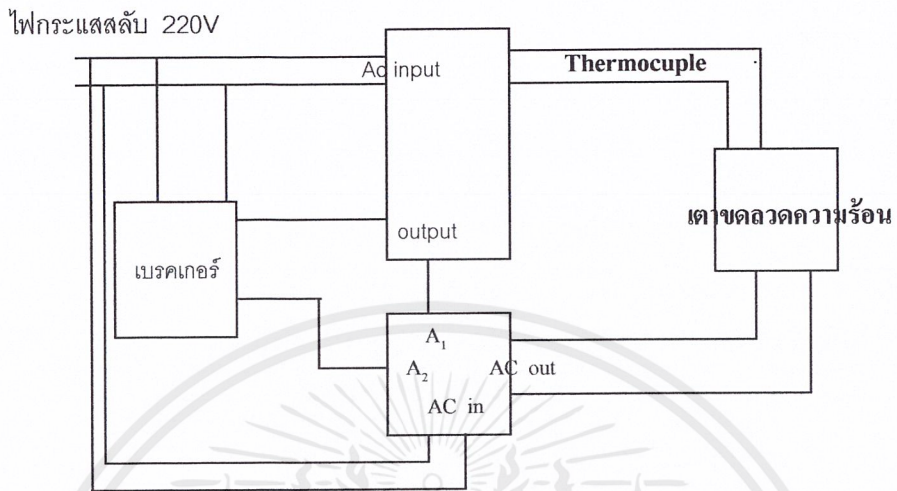
3.1.3.1 ตัวเตาเผาขดลวดความร้อน เป็นเตาเผาขนาดเล็ก ที่ใช้ขดลวดความร้อนแบบ VTR-E ลักษณะเตาเป็นทรงกระบอก ประกอบด้วย เป้าเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบขดลวดความร้อนนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



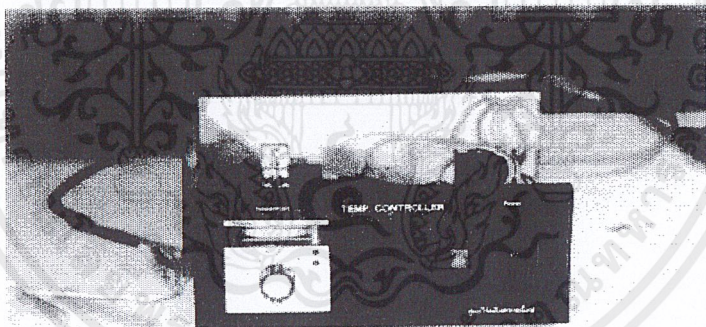
รูปที่ 3.2 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส

3.1.3.2 หัววัดอุณหภูมิเตาเผา ประกอบด้วยหลอดเซรามิกทนความร้อนสำหรับใส่หัววัดเข้าไปในเตาเผา และหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K, Chromel Alumel)

3.1.3.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดควบคุมอุณหภูมิใช้ Electronic Temperature Controller ซึ่งใช้ได้กับเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-12,000 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของเตาให้คงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จาก Controller ไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัด-ต่อ ไฟเลี้ยงขดลวดความร้อนของเตาเผาความผิดพลาดของอุณหภูมิของเตาประมาณไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงชุดควบคุมอุณหภูมิของเตา

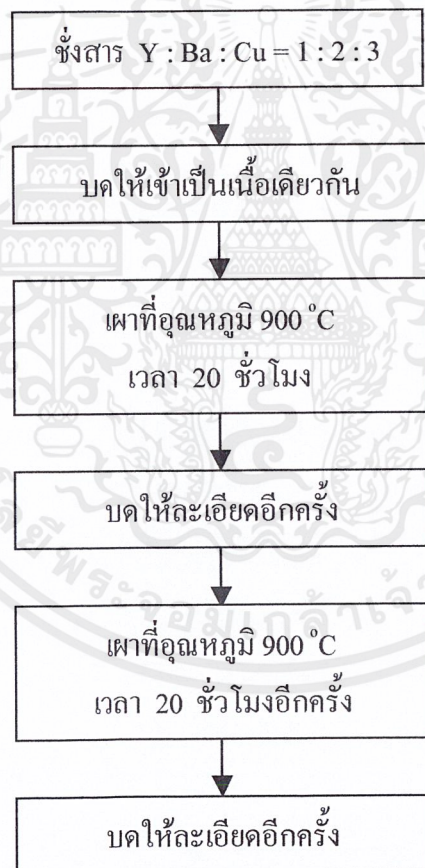


รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาความร้อนสูง 1,200 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ขั้นตอนการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

- (1) ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยอัตราส่วนธาตุ $Y : Ba : Cu : O$ เป็น $1 : 2 : 3$
- (2) บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
- (3) ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
- (4) นำสารที่เผามาเขี่ยส่วนสีเขียวออก จากนั้นนำสารมาบดให้ละเอียดอีกครั้ง
- (5) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส นาน 20 ชั่วโมง อีกครั้ง
- (6) บดให้ละเอียดอีกครั้ง

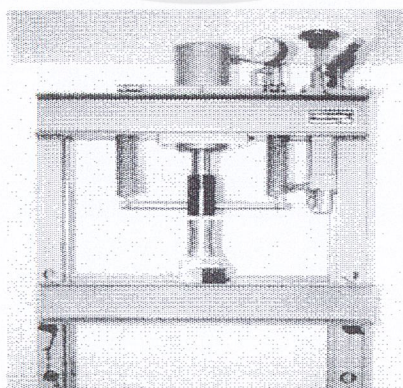
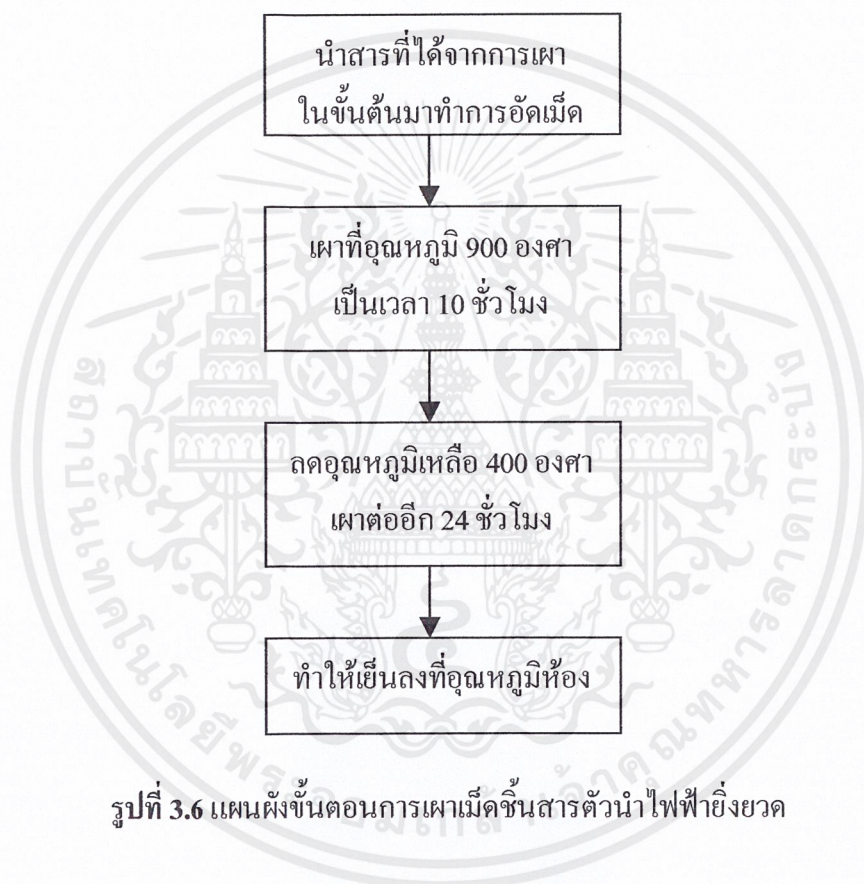


รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

- (1) นำสารที่ได้จากการเผาในขั้นต้นมาทำการอัดเม็ด เม็ดละ 1 กรัม ที่แรงดัน 1 ตัน
- (2) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศา เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- (3) ลดอุณหภูมิเหลือ 400 องศาเซลเซียส เผาต่อไปอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (4) ทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

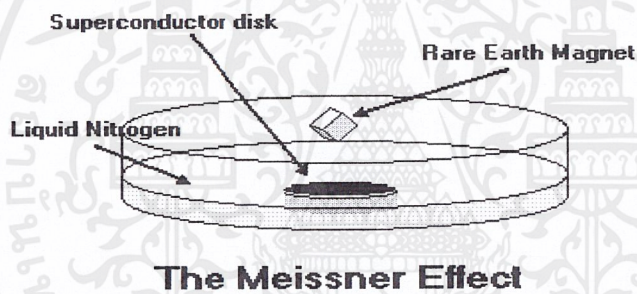
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบการมีสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลังจากได้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการอัดเม็ดแล้ว ต้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ว่าชิ้นสารที่ได้มีคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่

3.2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

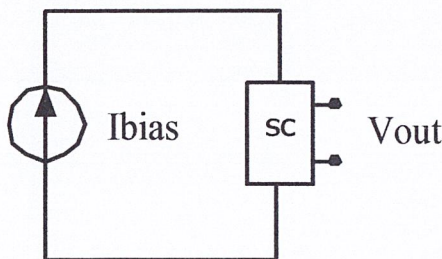
เป็นวิธีทดสอบพื้นฐานของการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาแล้วไปลดอุณหภูมิในไนโตรเจนเหลว เมื่อเม็ดสารเกิดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยแม่เหล็กสำหรับทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กที่นำมาใช้เป็นแม่เหล็กแบบซามาเรียมบอลล์ (Sm-Co) ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าแม่เหล็กทั่วไปเพื่อความชัดเจนในการแสดงผล



รูปที่ 3.8 ผลของการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่ได้จากการทดลอง

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เพื่อใช้หาค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยจะมีวงจรวัดดังรูป



รูปที่ 3.9 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเป็นการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ชุดทดลองจะประกอบด้วย

- (1) แหล่งจ่ายกระแส
- (2) จิน์สารตัวอย่างซึ่งต่อสายไฟเรียบร้อยแล้ว
- (3) ไนโตรเจนเหลว
- (4) Nanovolt Meter

3.2.2.2 ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ในการบัดกรีต่อสายตัวนำเข้ากับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก จะต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็น โอห์มมิก ชุดบัดกรีประกอบด้วยตะกั่วบัดกรีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งมีส่วนผสมของอินเดียม และชุดควบคุมอุณหภูมิหัวแร้ง

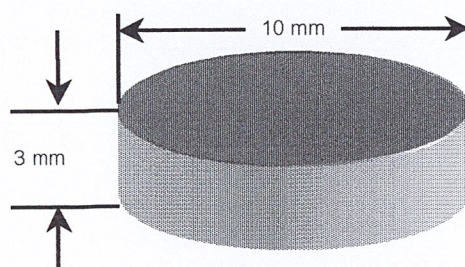


รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก

3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

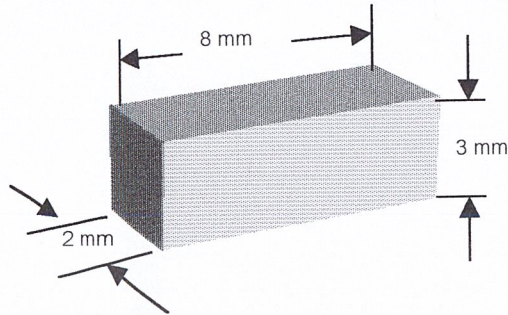
3.3.1 ลักษณะการขึ้นรูปของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

นำชิ้นสารที่ได้ทำการอัดเม็ดมาตะไบให้มีขนาดดังรูป



(ก) แสดงชิ้นสารที่ทำการอัดเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) แสดงชิ้นสารที่ทำการตะไบตามขนาด
รูปที่ 3.11 แสดงชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

3.3.2 การสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

ทำการสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการทดลอง มีตำแหน่งดังรูปที่ 3.13

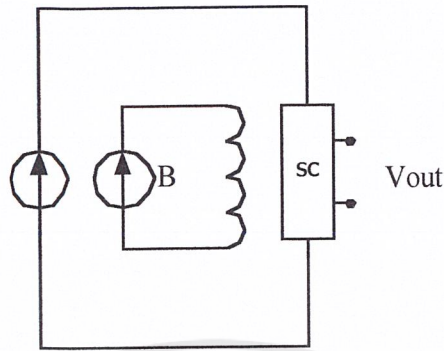


รูปที่ 3.12 แสดงจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

จากรูป การสร้างจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด ในการบัดกรีต่อสายตัวนำเข้ากับตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด จะต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็นโอห์มมิก โดยใช้ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดตามหัวข้อที่ 3.2.2.2

3.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

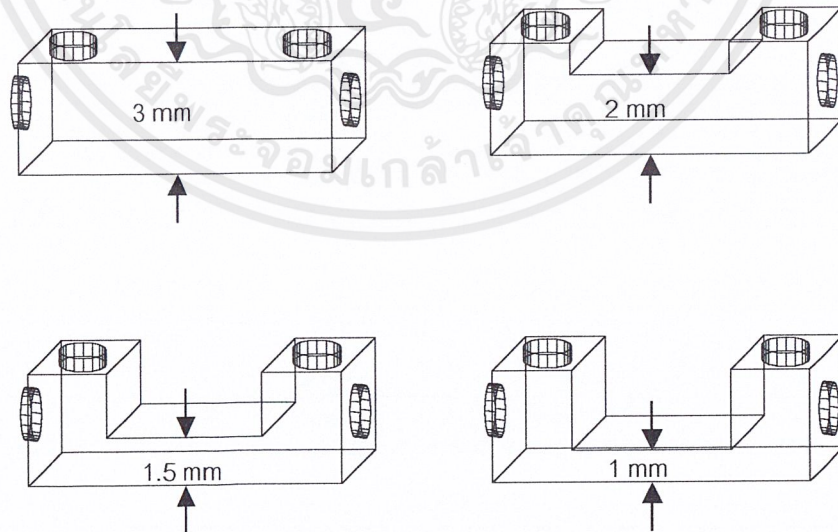
วงจรที่ใช้ในการทดลองผลกระทบของสนามแม่เหล็กต่อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดแสดงดังรูปที่ 3.13 โดยจะทำการปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.13 แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง

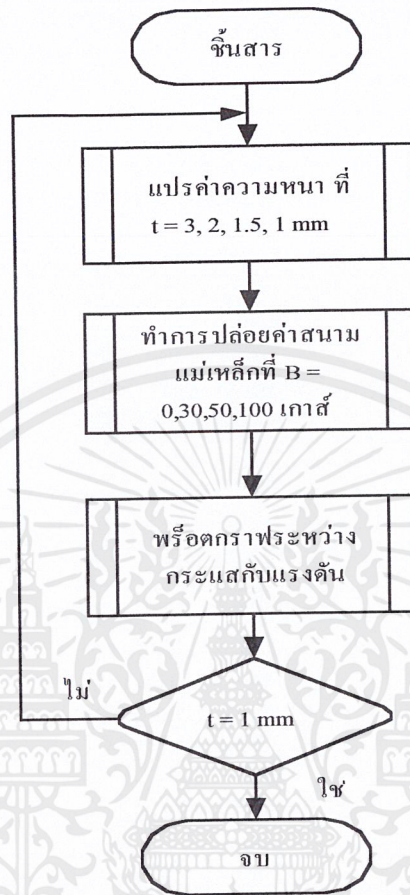
3.5 ขั้นตอนในการทดลอง

- (1) ทำการแปรค่าความหนาของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยืด
- (2) ทำการให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยืด
- (3) ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยืดที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำมีค่า 0, 30, 50 และ 100 เกาส์
- (4) เริ่มทำการวัดตั้งแต่ ข้อที่ 1-3 โดยทำการแปรค่าความหนาต่างๆ ตามลำดับดังนี้ 3, 2, 1.5, 1 mm.



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยืดที่ความหนาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

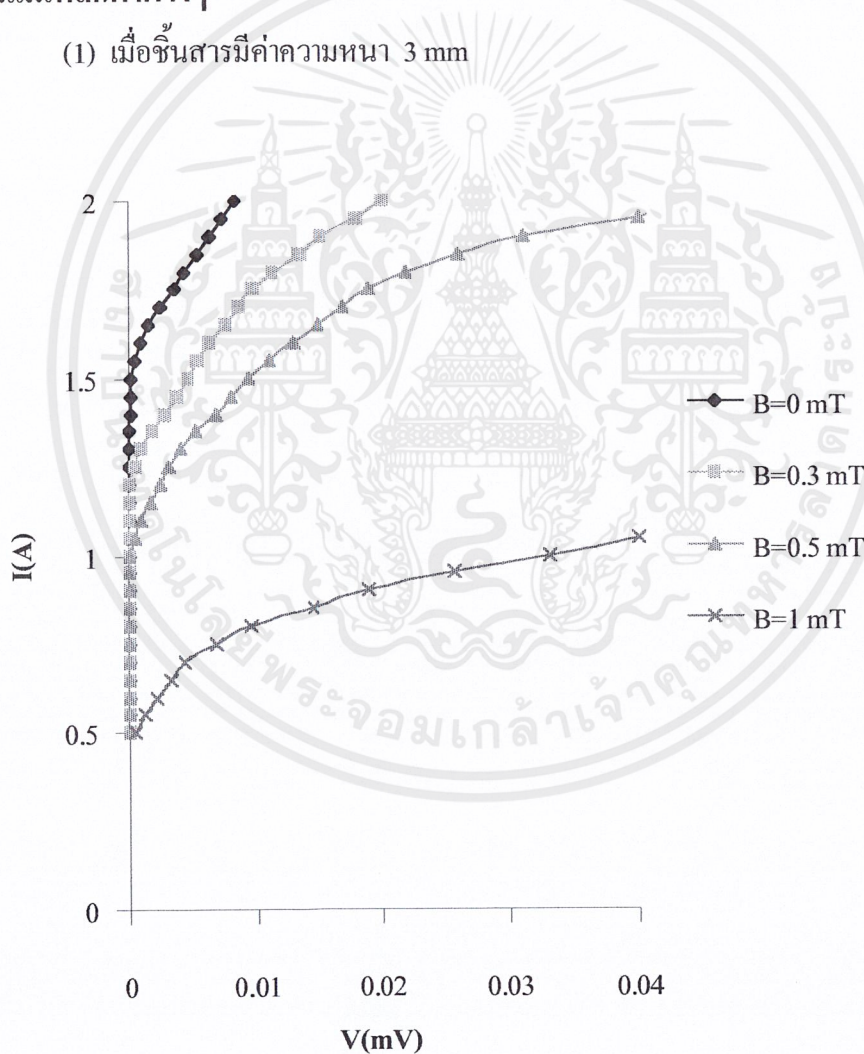
บทที่ 4

ผลการทดลองและแนวทางการประยุกต์

4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

4.1.1 เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

(1) เมื่อชิ้นสารมีค่าความหนา 3 mm

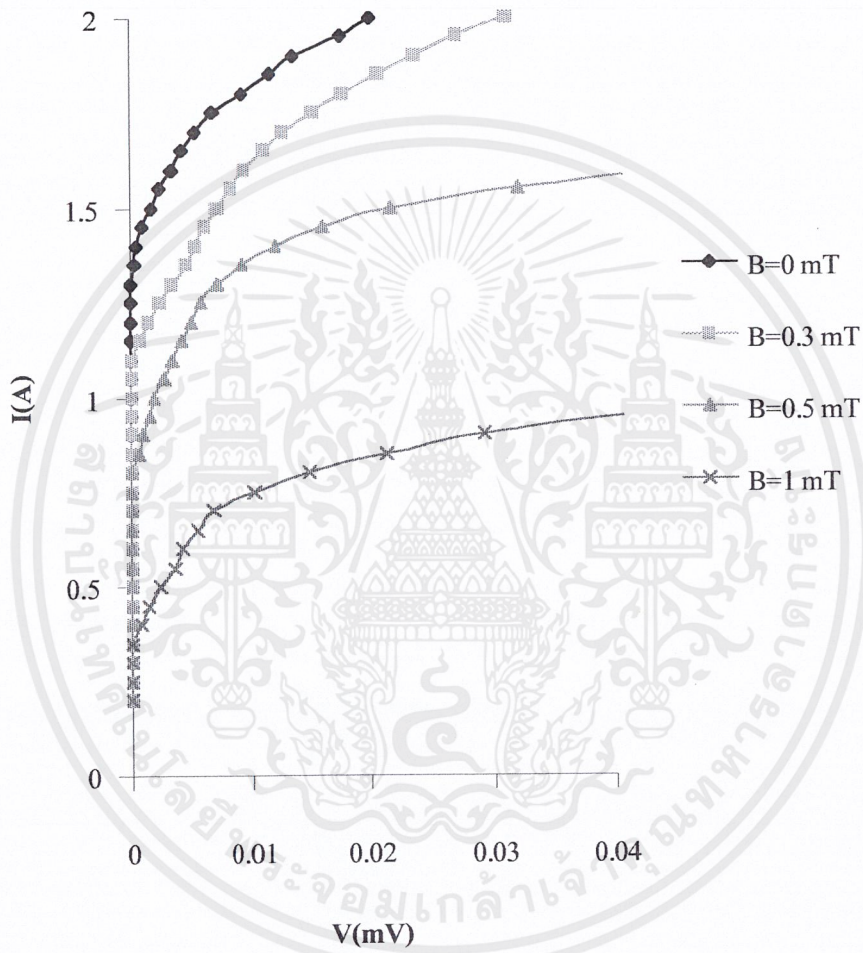


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

เมื่อชิ้นสารมีความหนา 3 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

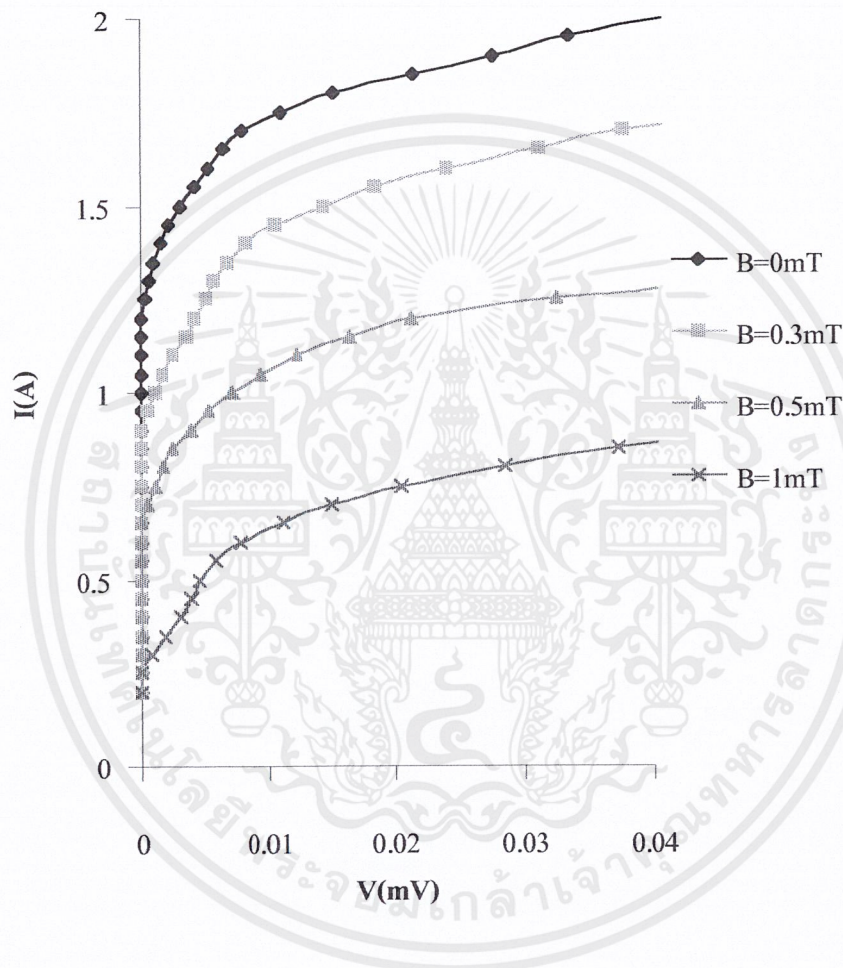
(2) เมื่อขึ้นสารมีค่าความหนา 2 mm



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ
เมื่อขึ้นสารมีความหนา 2 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

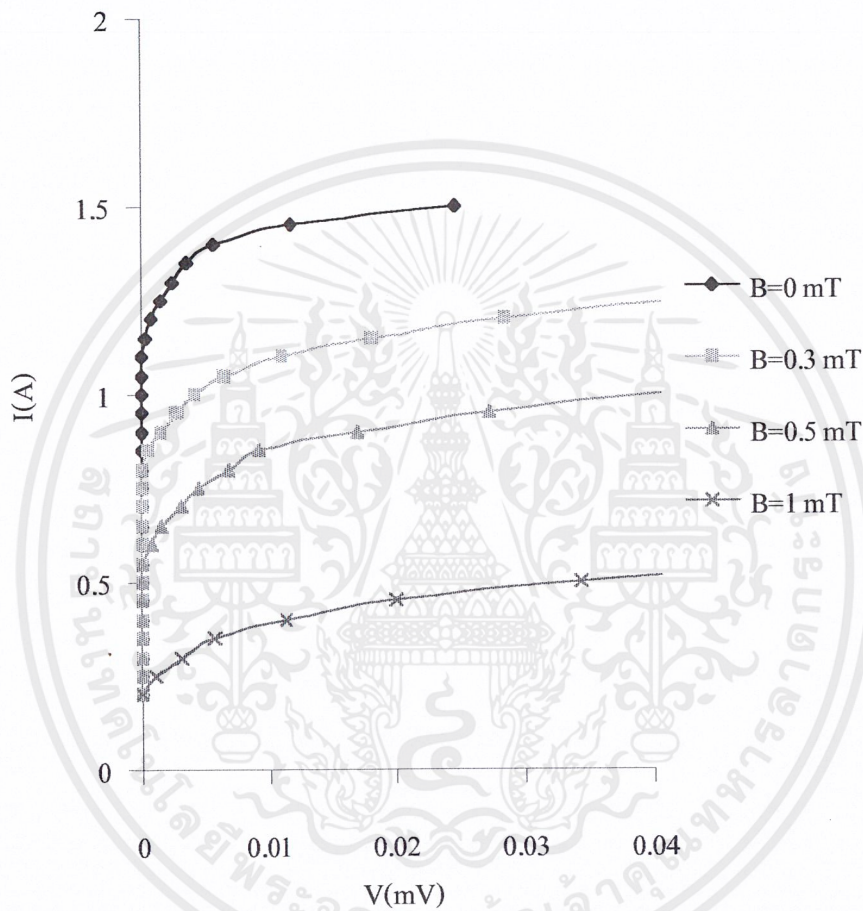
(3) เมื่อขึ้นสารมีค่าความหนา 1.5 mm



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ
เมื่อขึ้นสารมีความหนา 1.5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) เมื่อขึ้นสารมีค่าความหนา 1 mm

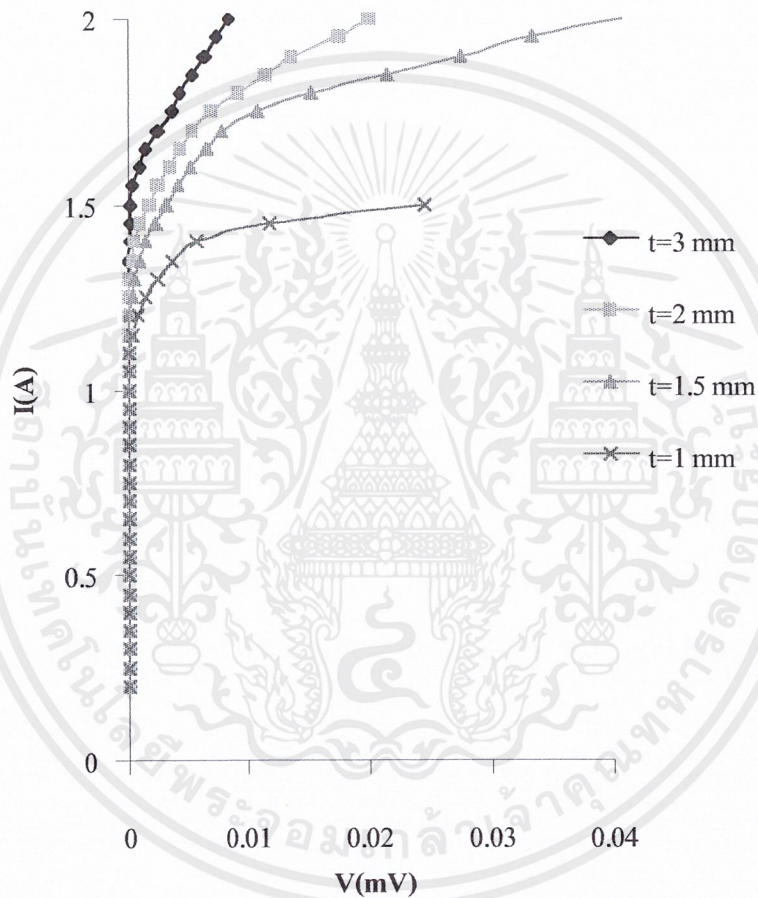


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ
เมื่อขึ้นสารมีความหนา 1 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อพิจารณาถึง การเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าความหนาต่างๆ

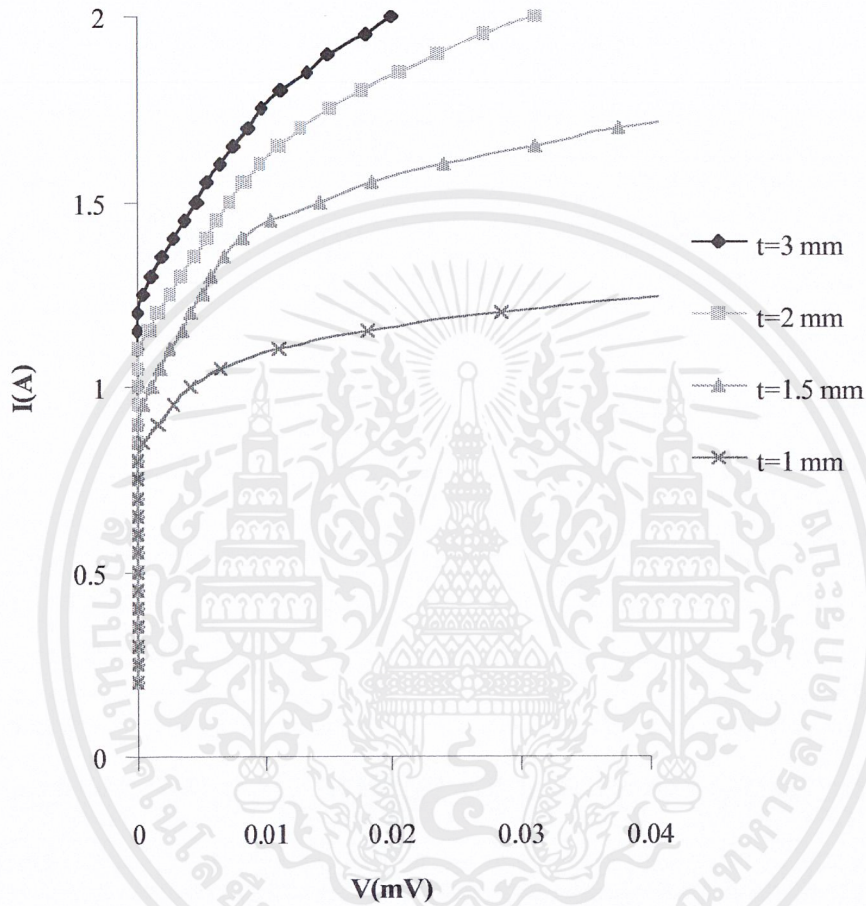
(1) เมื่อชิ้นสารได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก 0 mT



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ 0 mT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

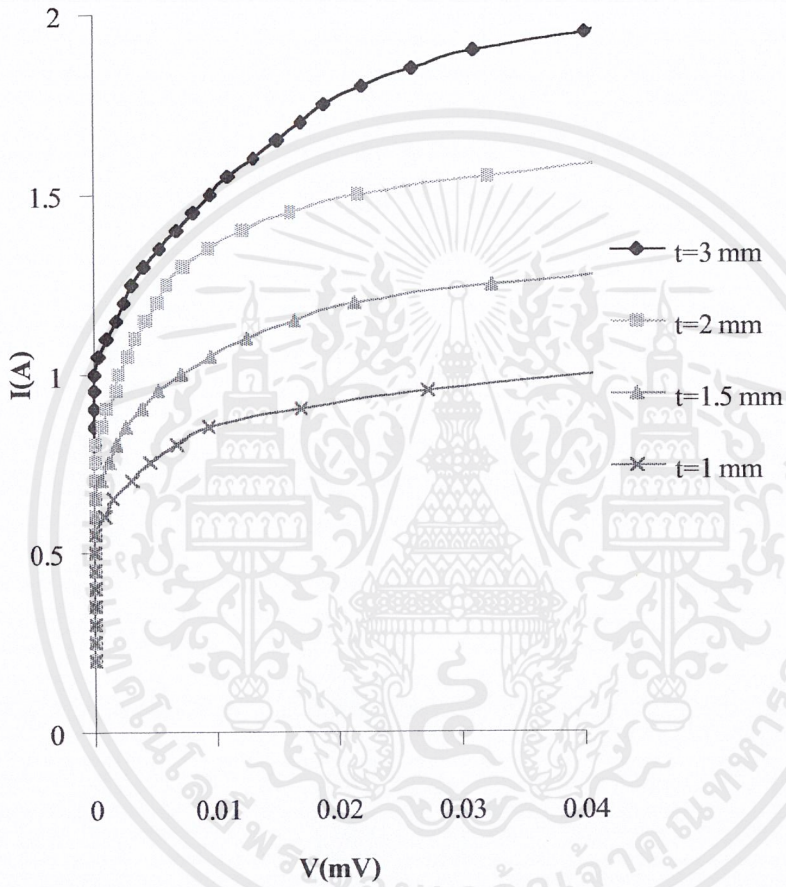
(2) เมื่อชั้นสารได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก 0.3 mT



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ
เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ 0.3 mT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

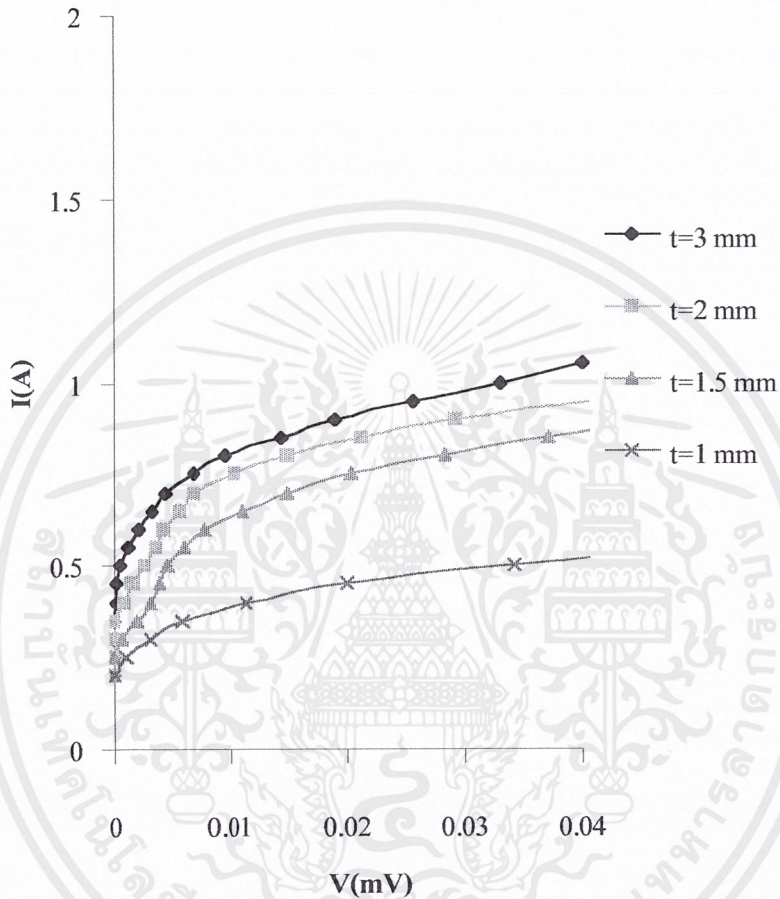
(3) เมื่อขึ้นสารได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก 0.5 mT



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ
เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ 0.5 mT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

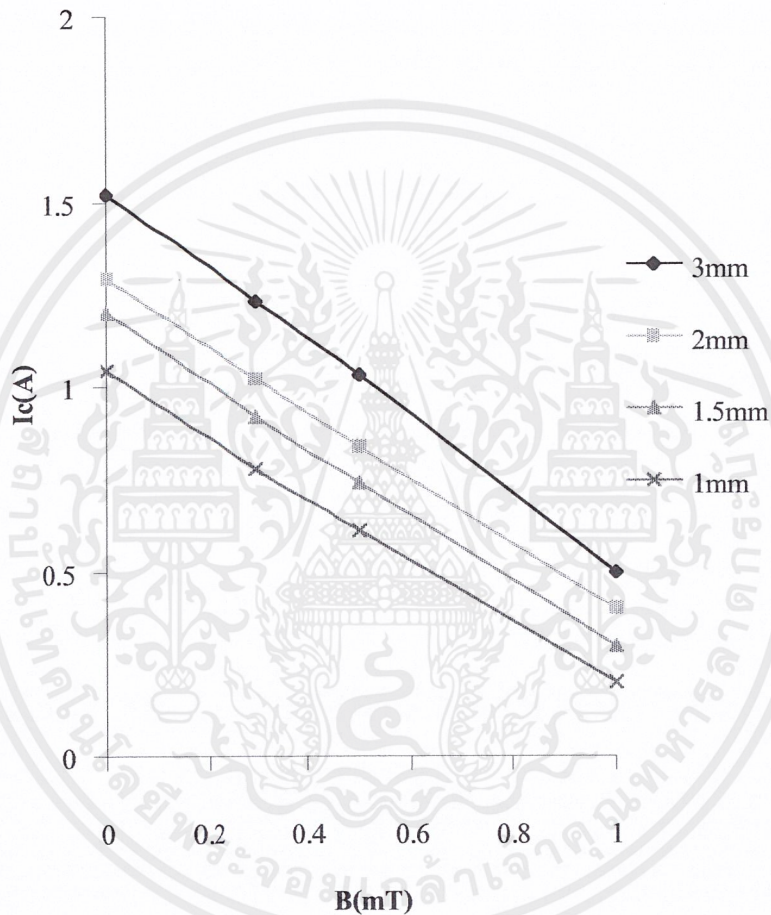
(4) เมื่อชิ้นสารได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก 1 mT



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ค่าความหนาต่างๆ
เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่า 1 mT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากระแสวิกฤตกับค่าสนามแม่เหล็กที่ค่าความหนาต่างๆ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับค่าสนามแม่เหล็กเมื่อชิ้นสารมีความหนาต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองลดค่าความหนาของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลง ผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เปลี่ยนไป เมื่อพิจารณากราฟการทดลองเมื่อชิ้นสารมีความหนา 3 mm พิจารณาที่ค่าสนามแม่เหล็ก 0 mT ค่ากระแสวิกฤตที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 1.4 A. ที่สนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน เมื่อลดความหนาของชิ้นสารเหลือ 2 mm จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงเหลือ 1.3 A. ที่ความหนา 1.5 mm ค่ากระแสวิกฤตจะมีค่า 1.2 A. และที่ความหนา 1 mm จะเหลือค่ากระแสวิกฤตเพียง 1.1 A.

เมื่อทำการทดลองเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยพิจารณาที่ค่าความหนาเท่ากัน ผลของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีกระแสวิกฤตลดลง เนื่องจากว่าสนามแม่เหล็กที่ได้รับมีค่าเกินค่าสนามวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับค่าสนามแม่เหล็กที่ความหนาของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าต่างๆ กันดังรูปที่ 4.9

4.4 แนวทางการประยุกต์ใช้งานชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 ทำให้สามารถนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กได้ โดยการพิจารณาผลของการทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก เมื่อทำการไบอัสชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีค่าเท่ากับ หรือน้อยกว่าค่ากระแสวิกฤต เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับชิ้นสารเกินค่าสนามวิกฤตของตัวชิ้นสาร จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นที่ตัวชิ้นสาร จากการทดลองถ้าชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้รับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น แรงดันตกคร่อมที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถนำค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมตัวชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งแปรผันตามกับค่าสนามแม่เหล็กที่มากระทำไปใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กได้

บทที่ 5

บทสรุปและวิจารณ์

จากการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมทั้งปรากฏการณ์ต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีประโยชน์กับการประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก มีดังนี้

(1) เมื่อขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้รับผลของสนามแม่เหล็กจากภายนอกเกินค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต จะทำให้ขึ้นสารเสียสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวขึ้นสารขึ้น

(2) เมื่อทำการลดขนาดความหนาของขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตของขึ้นสารมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลองขนาดความหนาของขึ้นสารที่มีค่า 1 mm ที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ แรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีความหนามากกว่า เมื่อพิจารณาที่สนามแม่เหล็กค่าเดียวกันทำให้สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ ได้ดี

(3) เมื่อพิจารณาถึงขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีค่าความหนามากขึ้น จะไม่สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็กค่าๆ ได้ เพราะแรงดันตกคร่อมขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่เมื่อค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากๆ แรงดันตกคร่อมขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้วัดได้ไม่ดีเฉพาะค่าสนามแม่เหล็กค่ามากๆ

ดังนั้นจากการทดลองขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีขนาดความหนาไม่มาก จะสามารถใช้ตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าขึ้นสารที่มีความหนามากกว่า ในการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น เครื่องมือที่ทำการวัดแรงดันตกคร่อมขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีความแม่นยำสูง จะมีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งานจริง ดังนั้นต้องทำการขยายขนาดของแรงดันตกคร่อมขึ้นสารเพื่อให้สามารถตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้ง่ายขึ้น จึงนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่มีความคล่องตัวในการใช้งานมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก หน่วยและสัญลักษณ์ที่น่าสนใจ

ตารางที่ ก.1

ปริมาณ	ชื่อหน่วย	สัญลักษณ์ของหน่วย
ความยาว	เมตร	ม.(m)
	เซนติเมตร	ซม.(cm)
	มิลลิเมตร	มม.(mm)
มวล	กรัม	ก.(g)
เวลา	ชั่วโมง	ชม. (h)
	นาที	นาที (min)
	วินาที	วินาที (sec)
อุณหภูมิ	เคลวิน	เคลวิน (K)
	เซลเซียส	เซลเซียส °C
ความเข้มสนามแม่เหล็ก	เกาส์	เกาส์ (G)
แรงดัน	ตัน	Ton
กระแสไฟฟ้า	แอมแปร์	A
แรงดันไฟฟ้า	โวลต์	V
ความต้านทาน	โอห์ม	Ω
ปริมาณสาร	โมล	Mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข ตารางเทียบแรงดันออกของเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิ

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆ ของเทอร์โมคัปเปิล
สายสี่ขา-ขาวซึ่งใช้ในชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผา

T °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458		
-100	-3.533	-3.852	-4.138	-4.410	-4.669	-4.912	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
(-)0	0.00	-0.392	-0.777	-1.516	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
(+)0	.000	0.973	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.805	3.266	3.681
100	4.096	4.508	4.919	5.227	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.314	9.974	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	12.207	12.623	13.093	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	2.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.227	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.366
800	33.277	33.686	34.095	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.225	37.724	38.122	38.519	38.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.879
1000	41.269	41.675	42.045	42.433	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.228	46.612	46.985	47.456	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.045
1300	52.398	52.747	53.093	53.439	53.782	54.125	54.466	54.807		

หมายเหตุ แสดงค่าแรงดันมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 แสดงคุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (องศา)	จุดเดือด (องศา)
Y	88.905	1,509	2,927
Ba	137.34	725	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.9994	-218.8	-183
C	12.01115	3,527	3,727

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

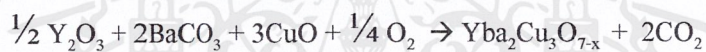
ภาคผนวก ง

การเตรียมสารเคมีในการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์เตรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99% แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.99% , คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ความบริสุทธิ์ 99.99% นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยมีอัตราส่วนของธาตุ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 ซึ่งสามารถสร้างเป็นสารประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

การคำนวณหาน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการสร้างหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากปฏิกิริยาทางเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการ ได้ดังนี้



พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของสารประกอบจากสมการจะได้ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3

มวลอะตอมของธาตุ

จากตารางธาตุ จะได้มวลอะตอมของธาตุ คือ Y = 88.905 g , O = 15.9994 g

Ba = 137.34 g , C = 12.01115 g , Cu = 63.546 g

มวลของสารประกอบตั้งต้น คือ

$$Y_2O_3 = (2 \times 88.905) + (3 \times 15.999) = 225.807 \text{ g/mol}$$

$$BaCO_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.999) = 197.348 \text{ g/mol}$$

$$CuO = 63.546 + 15.999 = 79.545 \text{ g/mol}$$

การคำนวณ จากสมการเคมี

1. Y_2O_3 1 mol ต้องเตรียมสาร = 225.807 g

ถ้า $\frac{1}{2}$ mol ต้องเตรียมสาร = 112.9035 g

2. $BaCO_3$ 1 mol ต้องเตรียมสาร = 197.348 g

ถ้า 2 mol ต้องเตรียมสาร = 394.696 g

3. CuO 1 mol ต้องเตรียมสาร = 79.545 g

ถ้า 3 mol ต้องเตรียมสาร = 238.635 g

ส่วนออกซิเจนจะไม่นำมาคิดในมวลโมเลกุลของสารตั้งต้นเพราะขณะทำปฏิกิริยา(การเผา)

เราจะได้นั้นมาจากอากาศอยู่แล้ว

ดังนั้น มวลโมเลกุลรวมของสารตั้งต้นทั้งหมด = 112.9035 + 394.696 + 238.635

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 746.2345 \text{ g}$$

ซึ่งหมายถึงว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ $\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ $= 746.2345 \text{ g}$

ปริมาณ x หมายถึง ปริมาณของออกซิเจน ที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่า ตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่เราไม่ต้องการ

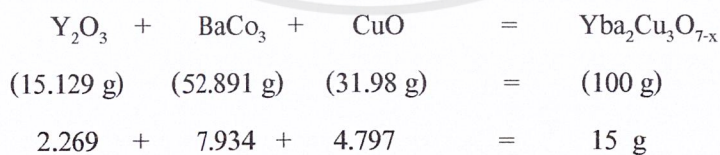
ดังนั้น ปริมาณ x ควรลดให้เป็นศูนย์ ($x \rightarrow 0$) ซึ่งขบวนการการกำจัดออกซิเจนนี้ เรียกว่า Calceine Process ซึ่งเป็นขบวนการกำจัดออกซิเจนโดยใช้ความร้อน

จากปฏิกิริยาเคมี มวลโมเลกุลสารตั้งต้นทั้งหมด 746.2345 g ต้องใช้ Y_2O_3 112.9035 g

$$\text{ถ้าต้องใช้ } \text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} \text{ } 100 \text{ g} \quad \text{ต้องใช้ } \text{Y}_2\text{O}_3 \quad \frac{112.9035 \times 100}{746.2345} = 15.129 \text{ g}$$

$$\text{ต้องใช้ } \text{BaCO}_3 \quad \frac{394.696 \times 100}{746.2345} = 52.891 \text{ g}$$

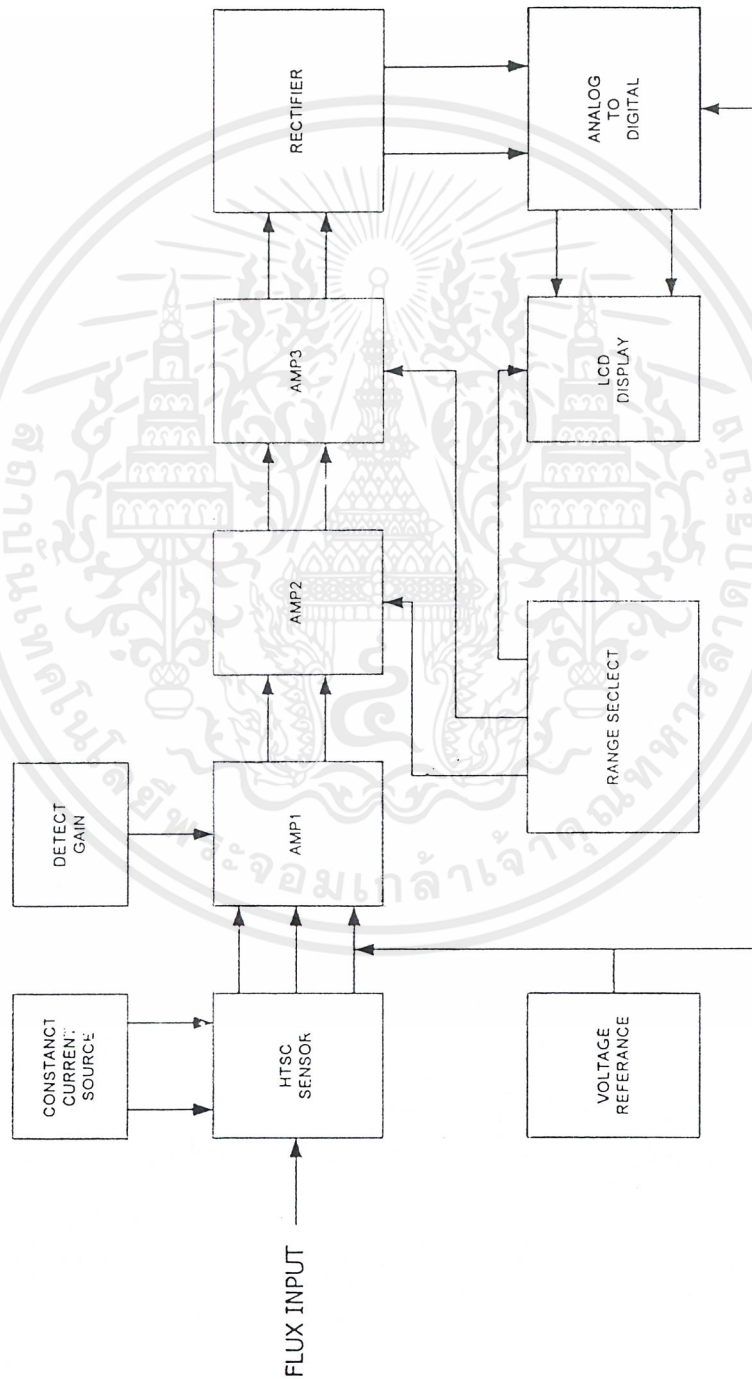
$$\text{ต้องใช้ } \text{CuO} \quad \frac{238.635 \times 100}{746.2345} = 31.98 \text{ g}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

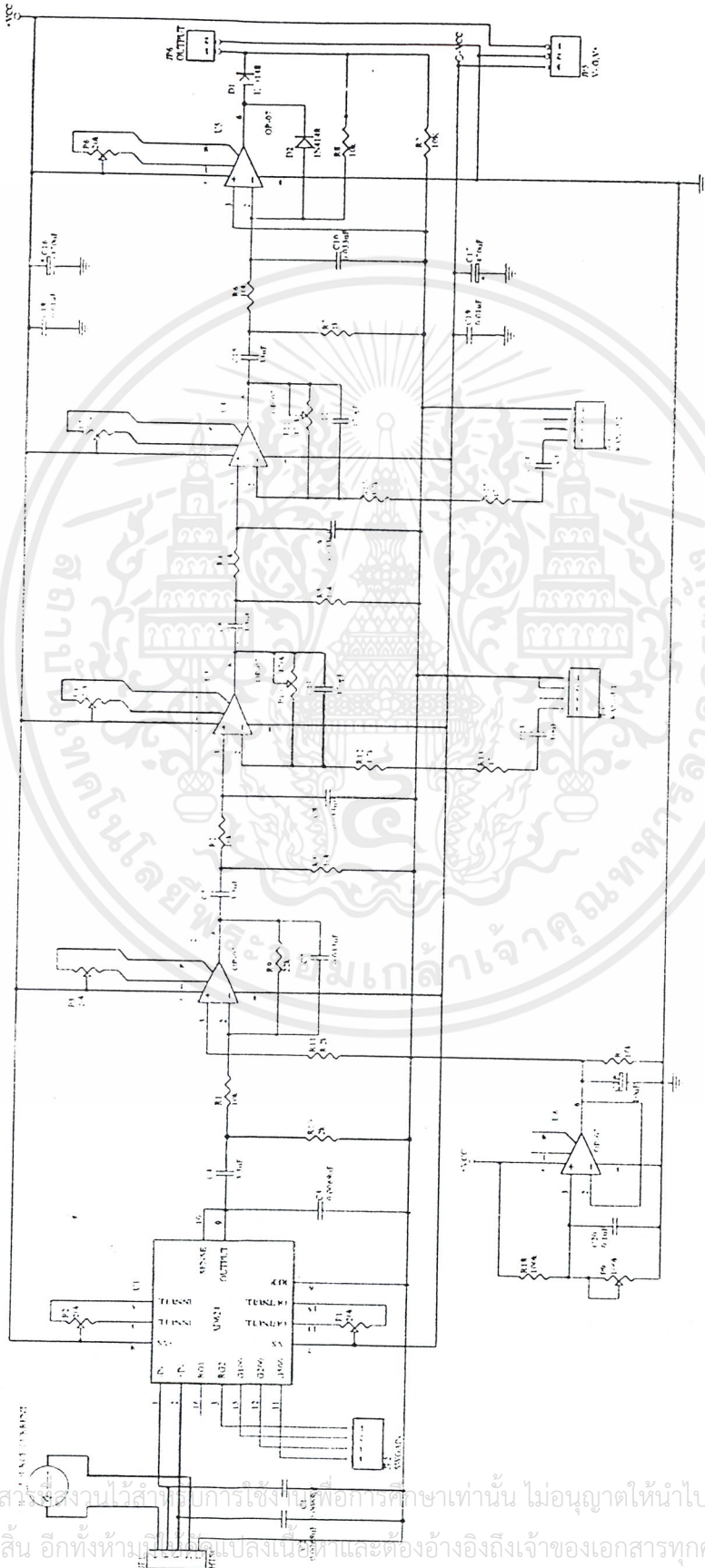
ภาคผนวก จ วงจรประยุกต์ใช้งานหัววัดสนามแม่เหล็กแบบพกพา

รูปแสดงแผนผังการทำงานของวงจร Magnetic Sensor



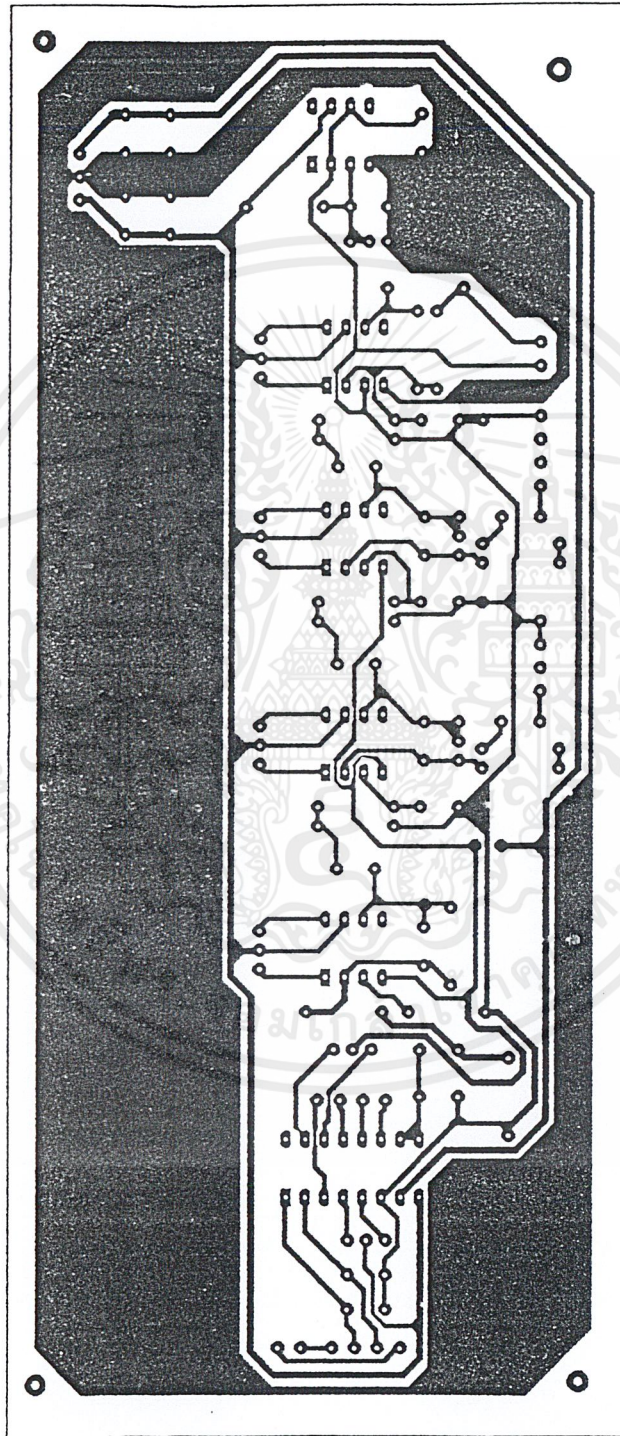
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



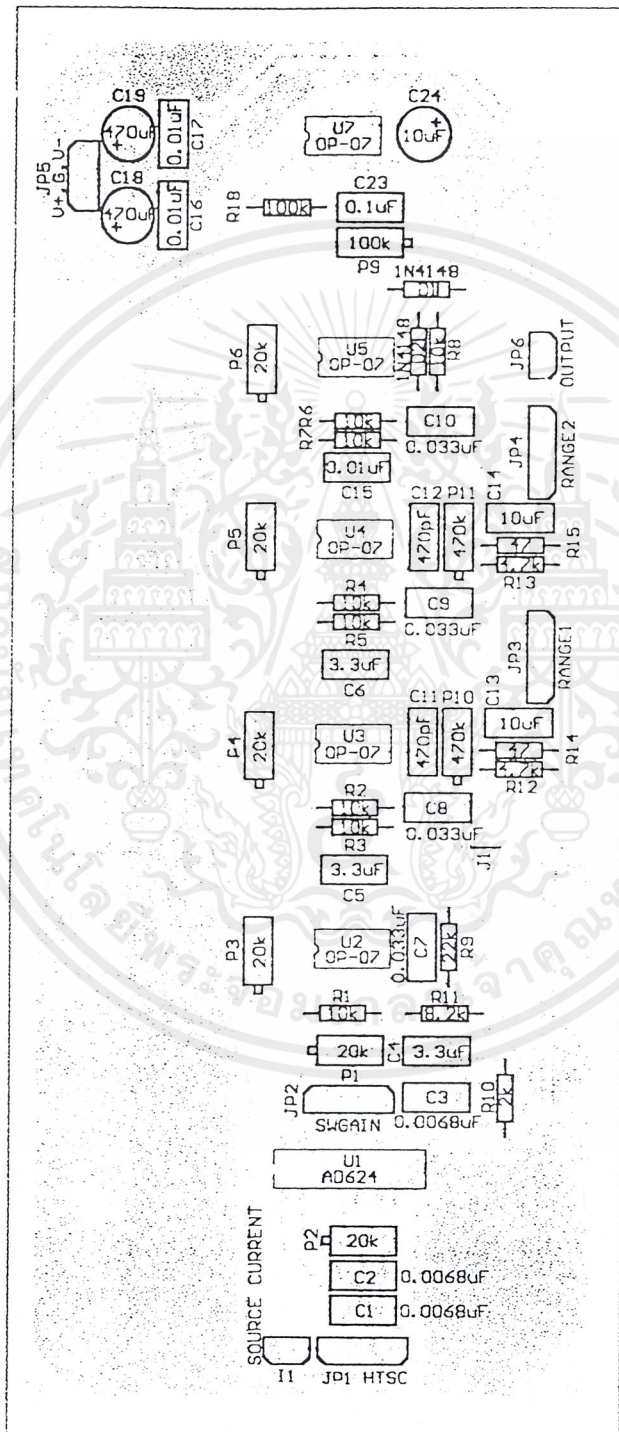
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การคุ้มครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงลายแผ่นวงจรพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแสดงตำแหน่งการลงอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. The entire design is surrounded by a decorative border. The Thai text around the border reads "วิทยาลัยราชภัฏบรจรม" at the top and "มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรม" at the bottom.

ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้งานในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEATURES

- Low V_{OS} $25\mu V$ Max
- Low V_{OS} Drift $0.6\mu V/^{\circ}C$ Max
- Ultra-Stable vs Time $1.0\mu V/\text{Month}$ Max
- Low Noise $0.6\mu V_{p-p}$ Max
- Wide Input Voltage Range $\pm 14V$
- Wide Supply Voltage Range $\pm 3V$ to $\pm 18V$
- Fits 725, 108A/308A, 741, AD510 Sockets
- $125^{\circ}C$ Temperature-Tested Dice

ORDERING INFORMATION †

$T_A = +25^{\circ}C$ V_{OS} MAX (μV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	TO-99	CERDIP 8-PIN	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT	
25	OP07AJ*	OP07AZ*	—	—	MIL
75	OP07EJ	OP07EZ	OP07EP	—	COM
75	OP07J*	OP07Z*	—	OP07RC/883	MIL
150	OP07CJ	OP07CZ	OP07CP	—	XIND
150	—	—	OP07CS††	—	XIND
150	OP07DJ	—	OP07DP	—	XIND

* For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.
 † Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in CerDIP, plastic DIP, and TO-can packages.
 †† For availability and burn-in information on SO and PLCC packages, contact your local sales office.

GENERAL DESCRIPTION

The OP-07 has very low input offset voltage ($25\mu V$ max for OP-07A) which is obtained by trimming at the wafer stage. These low offset voltages generally eliminate any need for external nulling. The OP-07 also features low input bias current ($\pm 2nA$ for OP-07A) and high open-loop gain ($300V/mV$ for OP-07A). The low offsets and high open-loop gain make the OP-07 particularly useful for high-gain instrumentation applications.

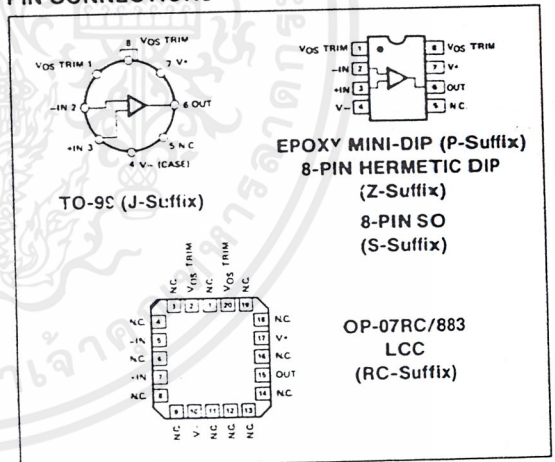
The wide input voltage range of $\pm 13V$ minimum combined with high CMRR of 110dB (OP-07A) and high input impedance provides high accuracy in the noninverting circuit configuration. Excellent linearity and gain accuracy can be maintained

even at high closed-loop gains. Stability of offsets and gain with time or variations in temperature is excellent. The accuracy and stability of the OP-07, even at high gain, combined with the freedom from external nulling have made the OP-07 a new industry standard for instrumentation and military applications.

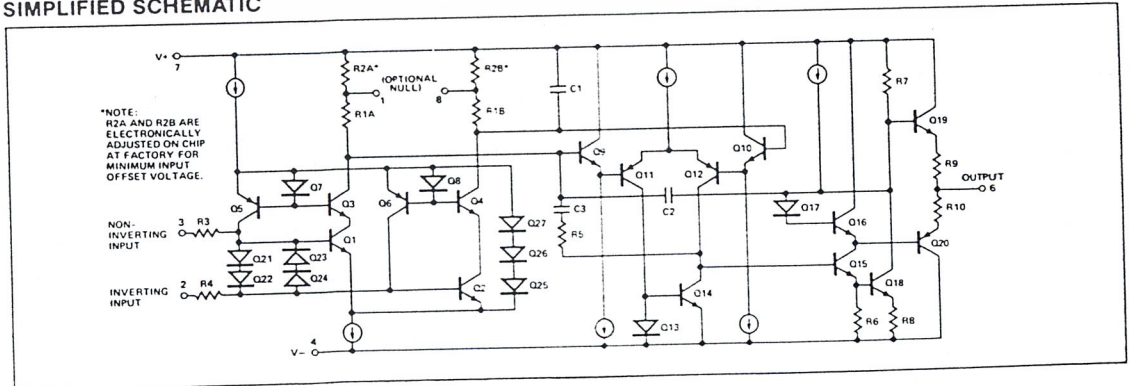
The OP-07 is available in five standard grades. The OP-07A and the OP-07 are specified for operation over the full military range of $-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$; the OP-07E is specified for operation over the $0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$ range, and OP-07C and D over the $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range.

The OP-07 is available in hermetically-sealed TO-99 metal can or ceramic 8-pin Mini-DIP, and in epoxy 8-pin Mini-DIP. It is a direct replacement for 725, 108A, and OP-05 amplifiers; 741-types may be directly replaced by removing the 741's nulling potentiometer. The OP-207, a dual OP-07, is available for applications requiring close matching of two OP-07 amplifiers. For improved specifications, see the OP-77/OP-177.

PIN CONNECTIONS



SIMPLIFIED SCHEMATIC



OP-07

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Supply Voltage	±22V
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage (Note 2)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range	
J, RC and Z Packages	-65°C to +150°C
P Package	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
OP-07A, OP-07, OP-07RC	-55°C to +125°C
OP-07E	0°C to +70°C
OP-07C, OP-07D	-40°C to +85°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C
Junction Temperature (T _J)	+150°C

PACKAGE TYPE	θ_{JA} (Note 3)	θ_{JC}	UNITS
TO-99 (J)	150	18	°C/W
8-Pin Hermetic DIP (Z)	148	16	°C/W
8-Pin Plastic DIP (P)	103	43	°C/W
20-Contact LCC	98	38	°C/W
8-Pin SO (S)	158	43	°C/W

NOTES:

1. Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.
2. For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
3. θ_{JA} is specified for worst case mounting conditions, i.e., θ_{JA} is specified for device in socket for TO, CerDIP, P-DIP, and LCC packages; θ_{JA} is specified for device soldered to printed circuit board for SO package.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at V_S = ±15V, T_A = 25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V _{OS}	(Note 1)	—	10	25	—	30	75	μV
Long-Term Input Offset Voltage Stability	ΔV _{OS} /Time	(Note 2)	—	0.2	1.0	—	0.2	1.0	μV/Mo
Input Offset Current	I _{OS}		—	0.3	2.0	—	0.4	2.8	nA
Input Bias Current	I _B		—	±0.7	±2.0	—	±1.0	±3.0	nA
Input Noise Voltage	e _{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	0.35	0.6	—	0.35	0.6	μV _{p-p}
Input Noise Voltage Density	e _n	f _O = 10Hz (Note 3)	—	10.3	18.0	—	10.3	18.0	nV/√Hz
		f _O = 100Hz (Note 3)	—	10.0	13.0	—	10.0	13.0	
		f _O = 1000Hz (Note 3)	—	9.6	11.0	—	9.6	11.0	
Input Noise Current	i _{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	14	30	—	14	30	pA _{p-p}
Input Noise Current Density	i _n	f _O = 10Hz (Note 3)	—	0.32	0.80	—	0.32	0.80	pA/√Hz
		f _O = 100Hz (Note 3)	—	0.14	0.23	—	0.14	0.23	
		f _O = 1000Hz (Note 3)	—	0.12	0.17	—	0.12	0.17	
Input Resistance — Differential-Mode	R _{IN}	(Note 4)	30	80	—	20	60	—	MΩ
Input Resistance — Common-Mode	R _{INCM}		—	200	—	—	200	—	GΩ
Input Voltage Range	IVR		±13	±14	—	±13	±14	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13V	110	126	—	110	126	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3V to ±18V	—	4	10	—	4	10	μV/V
Large-Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2kΩ, V _O = ±10V	300	500	—	200	500	—	V/mV
		R _L ≥ 500Ω, V _O = ±0.5V, V _S = ±3V (Note 4)	150	400	—	150	400	—	
		R _L ≥ 10kΩ	±12.5	±13.0	—	±12.5	±13.0	—	
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 2kΩ	±12.0	±12.8	—	±12.0	±12.8	—	V
		R _L ≥ 1kΩ	±10.5	±12.0	—	±10.5	±12.0	—	
		R _L ≥ 2kΩ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	
Slew Rate	SR	R _L ≥ 2kΩ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	V/μs
Closed-Loop Bandwidth	BW	A _{VCL} = +1 (Note 3)	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	MHz
Open-Loop Output Resistance	R _O	V _O = 0, I _O = 0	—	60	—	—	60	—	Ω
Power Consumption	P _d	V _S = ±15V, No Load	—	75	120	—	75	120	mW
		V _S = ±3V, No Load	—	4	6	—	4	6	
Offset Adjustment Range		R _P = 20kΩ	—	±4	—	—	±4	—	mV

NOTES:

1. OP-07A grade V_{OS} is measured approximately one minute after application of power. For all other grades V_{OS} is measured approximately 0.5 seconds after application of power.
2. Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation.

Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically 2.5μV — refer to typical performance curves. Parameter is sample tested.

3. Sample tested.
4. Guaranteed by design.

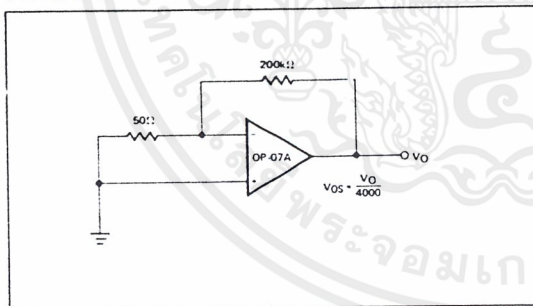
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	25	60	—	60	200	μV
Average Input Offset Voltage Drift Without External Trim	TCV_{OS}	(Note 2)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu V/^\circ C$
Average Input Offset Voltage Drift With External Trim	TCV_{OSn}	$R_p = 20k\Omega$ (Note 3)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.8	4	—	1.2	5.6	nA
Average Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	(Note 2)	—	5	25	—	8	50	$pA/^\circ C$
Input Bias Current	I_B		—	±1	±4	—	±2	±6	nA
Average Input Bias Current Drift	TCI_B	(Note 2)	—	8	25	—	13	50	$pA/^\circ C$
Input Voltage Range	IVR		±13	±13.5	—	±13	±13.5	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	106	123	—	106	123	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$	—	5	20	—	5	20	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$, $V_O = \pm 10V$	200	400	—	150	400	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	±12	±12.6	—	±12	±12.6	—	V

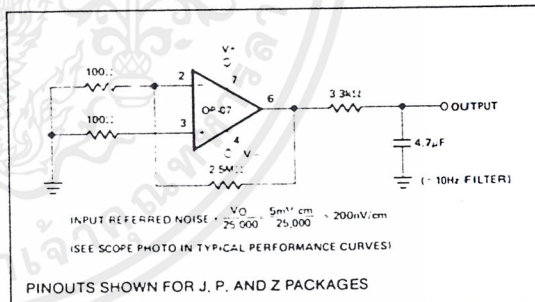
NOTES:

- OP-07A grade V_{OS} is measured approximately one minute after application of power. For all other grades V_{OS} is measured approximately 0.5 seconds after application of power.
- Sample tested.
- Guaranteed by design.

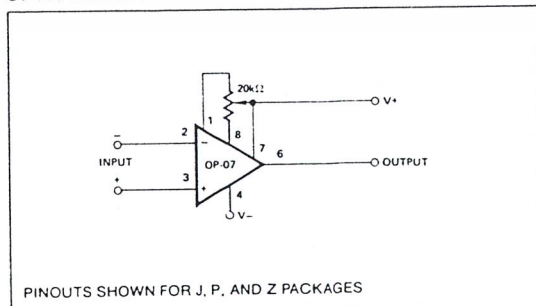
TYPICAL OFFSET VOLTAGE TEST CIRCUIT



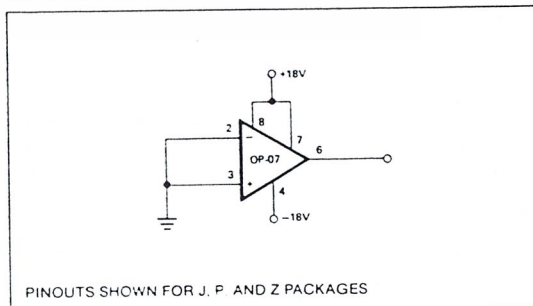
TYPICAL LOW-FREQUENCY NOISE TEST CIRCUIT



OPTIONAL OFFSET NULLING CIRCUIT



BURN-IN CIRCUIT



OP-07

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07E			OP-07C			OP-07D			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	30	75	—	60	150	—	60	150	μV
Long-Term V_{OS} Stability	V_{OS}/Time	(Note 2)	—	0.3	1.5	—	0.4	2.0	—	0.5	3.0	$\mu V/\text{Mo}$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.5	3.8	—	0.8	6.0	—	0.8	6.0	nA
Input Bias Current	I_B		—	± 1.2	± 4.0	—	± 1.8	± 7.0	—	± 2.0	± 12	nA
Input Noise Voltage	e_{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	0.35	0.6	—	0.38	0.65	—	0.38	0.65	μV_{p-p}
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_O = 10\text{Hz}$	—	10.3	18.0	—	10.5	20.0	—	10.5	20.0	$nV/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_O = 100\text{Hz}$ (Note 3)	—	10.0	13.0	—	10.2	13.5	—	10.3	13.5	
		$f_O = 1000\text{Hz}$	—	9.6	11.0	—	9.8	11.5	—	9.8	11.5	
Input Noise Current	i_{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	14	30	—	15	35	—	15	35	pA_{p-p}
Input Noise Current Density	i_n	$f_O = 10\text{Hz}$	—	0.32	0.80	—	0.35	0.90	—	0.35	0.90	$pA/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_O = 100\text{Hz}$ (Note 3)	—	0.14	0.23	—	0.15	0.27	—	0.15	0.27	
		$f_O = 1000\text{Hz}$	—	0.12	0.17	—	0.13	0.18	—	0.13	0.18	
Input Resistance — Differential-Mode	R_{IN}	(Note 4)	15	50	—	8	33	—	7	31	—	M Ω
Input Resistance — Common-Mode	R_{INCM}		—	160	—	—	120	—	—	120	—	G Ω
Input Voltage Range	IVR		± 13	± 14	—	± 13	± 14	—	± 13	± 14	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	106	123	—	100	120	—	94	110	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 16V$	—	5	20	—	7	32	—	7	32	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$, $V_O = \pm 10V$	200	500	—	120	400	—	120	400	—	V/mV
		$R_L \geq 500\Omega$, $V_O = \pm 0.5V$, $V_S = \pm 3V$ (Note 4)	150	400	—	100	400	—	—	400	—	
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 10k\Omega$	± 12.5	± 13.0	—	± 12.0	± 13.0	—	± 12.0	± 13.0	—	V
		$R_L \geq 2k\Omega$	± 12.0	± 12.8	—	± 11.5	± 12.8	—	± 11.5	± 12.8	—	
		$R_L \geq 1k\Omega$	± 10.5	± 12.0	—	—	± 12.0	—	—	± 12.0	—	
Slew Rate	SR	$R_L \geq 2k\Omega$ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	V/ μs
Closed-Loop Bandwidth	BW	$A_{VCL} = +1$ Note 5	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	MHz
Open-Loop Output Resistance	R_O	$V_O = 0$, $I_O = 0$	—	60	—	—	60	—	—	60	—	Ω
Power Consumption	P_d	$V_S = \pm 15V$, No Load	—	75	120	—	80	150	—	80	150	mW
		$V_S = \pm 3V$, No Load	—	4	6	—	4	8	—	4	8	
Offset Adjustment Range		$R_p = 20k\Omega$	—	± 4	—	—	± 4	—	—	± 4	—	mV

NOTES:

- Input Offset Voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power.
- Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically $2.5\mu V$ — refer to typical performance curves. Parameter is sample tested.
- Sample tested.
- Guaranteed by design.
- Guaranteed but not tested.

OP-07

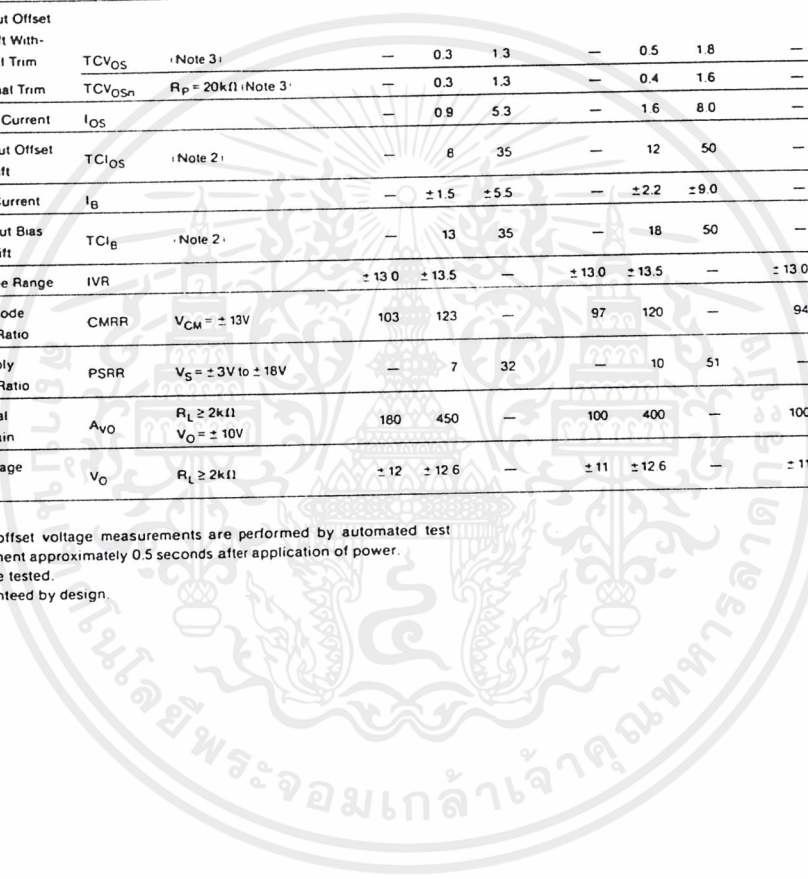
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ for OP-07E, and $-40^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ for OP-07C/D, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07E			OP-07C			OP-07D			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	45	130	—	85	250	—	85	250	μV
Average Input Offset Voltage Drift Without External Trim	TCV_{OS}	(Note 3)	—	0.3	1.3	—	0.5	1.8	—	0.7	2.5	$\mu V/^\circ C$
With External Trim	TCV_{OSn}	$R_P = 20k\Omega$ (Note 3)	—	0.3	1.3	—	0.4	1.6	—	0.7	2.5	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.9	5.3	—	1.6	8.0	—	1.6	8.0	nA
Average Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	(Note 2)	—	8	35	—	12	50	—	12	50	$pA/^\circ C$
Input Bias Current	I_B		—	± 1.5	± 5.5	—	± 2.2	± 9.0	—	± 3.0	± 14	nA
Average Input Bias Current Drift	TCI_B	(Note 2)	—	13	35	—	18	50	—	18	50	$pA/^\circ C$
Input Voltage Range	IVR		± 13.0	± 13.5	—	± 13.0	± 13.5	—	± 13.0	± 13.5	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	103	123	—	97	120	—	94	106	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$	—	7	32	—	10	51	—	10	51	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$ $V_O = \pm 10V$	180	450	—	100	400	—	100	400	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	± 12	± 12.6	—	± 11	± 12.6	—	± 11	± 12.6	—	V

NOTES:

1. Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power.
2. Sample tested.
3. Guaranteed by design.

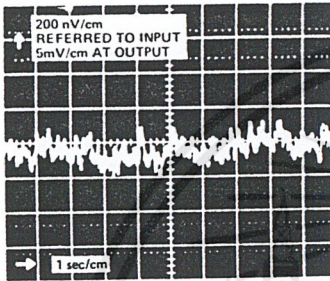
2



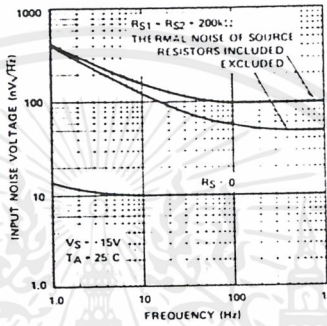
OP-07

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

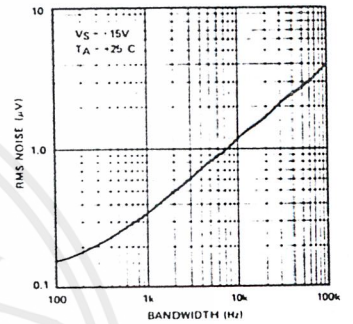
OP-07 LOW FREQUENCY NOISE



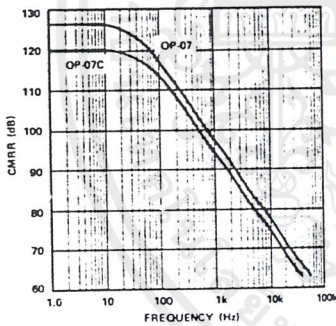
TOTAL INPUT NOISE VOLTAGE vs FREQUENCY



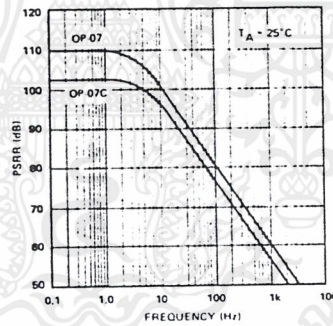
INPUT WIDEBAND NOISE vs BANDWIDTH (0.1Hz TO FREQUENCY INDICATED)



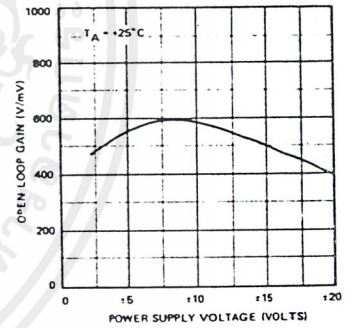
CMRR vs FREQUENCY



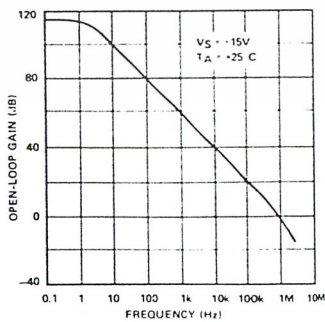
PSRR vs FREQUENCY



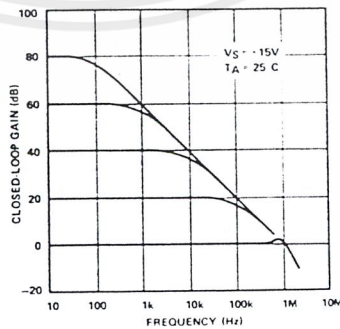
OPEN-LOOP GAIN vs POWER SUPPLY VOLTAGE



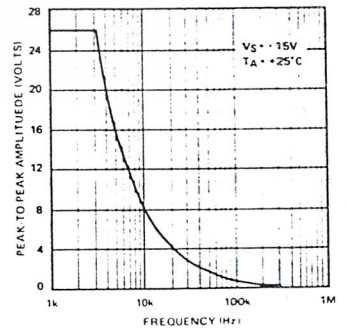
OPEN-LOOP FREQUENCY RESPONSE



CLOSED-LOOP RESPONSE FOR VARIOUS GAIN CONFIGURATIONS

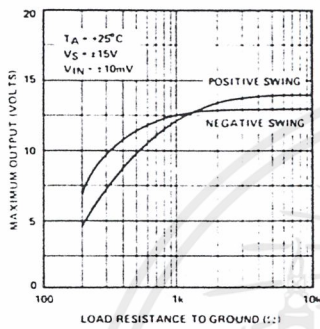


MAXIMUM OUTPUT SWING vs FREQUENCY

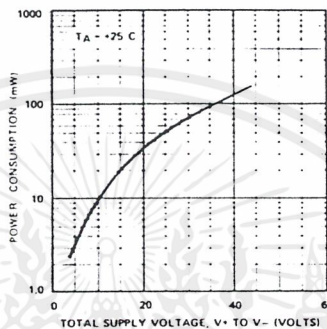


TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

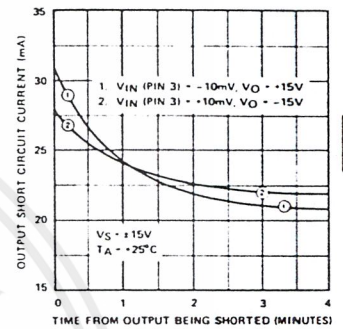
MAXIMUM OUTPUT VOLTAGE vs LOAD RESISTANCE



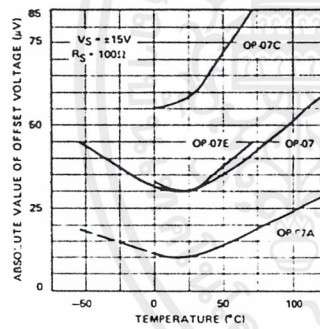
POWER CONSUMPTION vs POWER SUPPLY



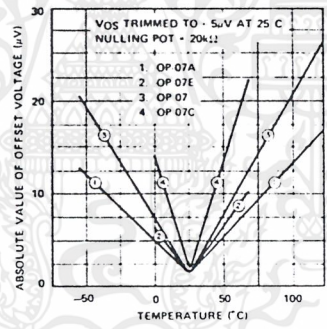
OUTPUT SHORT-CIRCUIT CURRENT vs TIME



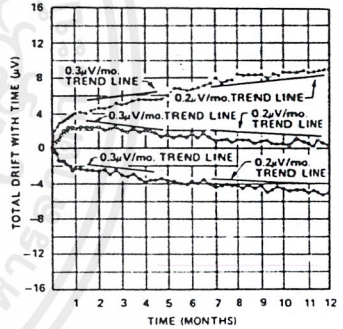
UNTRIMMED OFFSET VOLTAGE vs TEMPERATURE



TRIMMED OFFSET VOLTAGE vs TEMPERATURE

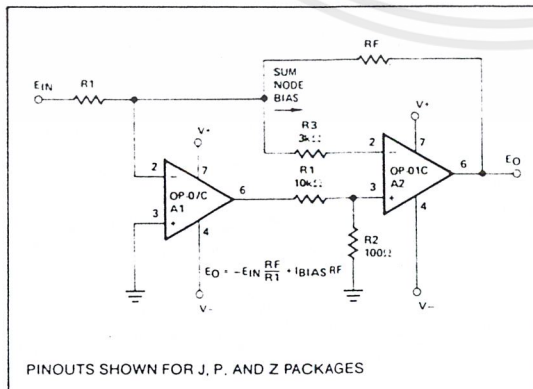


OFFSET VOLTAGE STABILITY vs TIME

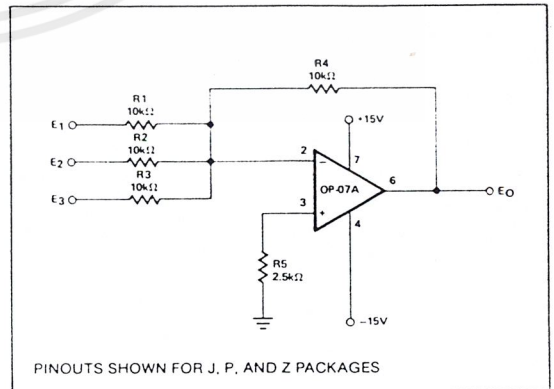


TYPICAL APPLICATIONS

HIGH SPEED, LOW VOS, COMPOSITE AMPLIFIER



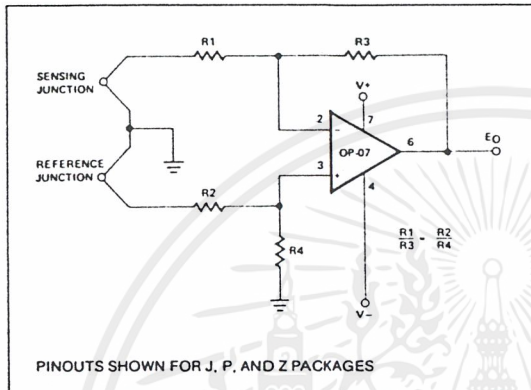
ADJUSTMENT-FREE PRECISION SUMMING AMPLIFIER



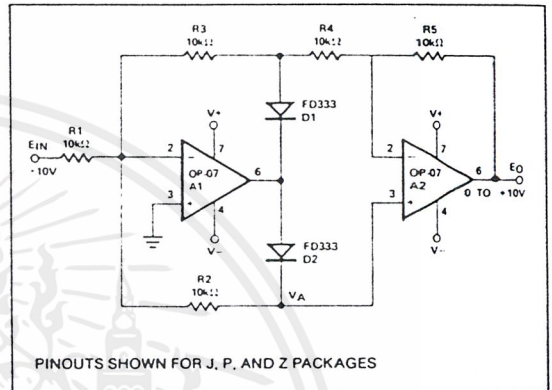
OP-07

TYPICAL APPLICATIONS

HIGH-STABILITY THERMOCOUPLE AMPLIFIER



PRECISION ABSOLUTE-VALUE CIRCUIT



APPLICATIONS INFORMATION

OP-07 series units may be substituted directly into 725, 108A/308A* and OP-05 sockets with or without removal of external compensation or nulling components. Additionally, the OP-07 may be used in unnulling 741-type sockets. However, if conventional 741 nulling circuitry is in use, it should be modified or removed to enable proper OP-07 operation. OP-07 offset voltage may be nulled to zero through use of a potentiometer (see offset nulling circuit diagram).

The OP-07 provides stable operation with load capacitance of up to 500pF and $\pm 10V$ swings; larger capacitances should be decoupled with a 50 Ω decoupling resistor.

Stray thermoelectric voltages generated by dissimilar metals at the contacts to the input terminals can degrade drift performance. Therefore, best operation will be obtained when both input contacts are maintained at the same temperature, preferably close to the package temperature.

*TO-99 Package only



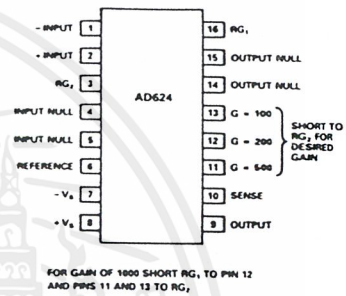
Precision Instrumentation Amplifier

AD624

FEATURES

- Low Noise: $0.2\mu\text{V}$ p-p 0.1Hz to 10Hz
- Low Gain TC: 5ppm max ($G = 1$)
- Low Nonlinearity: 0.001% max ($G = 1$ to 200)
- High CMRR: 130dB min ($G = 500$ to 1000)
- Low Input Offset Voltage: $25\mu\text{V}$, max
- Low Input Offset Voltage Drift: $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max
- Gain Bandwidth Product: 25MHz
- Pin Programmable Gains of 1, 100, 200, 500, 1000
- No External Components Required
- Internally Compensated

CONNECTION DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD624 is a high precision low noise instrumentation amplifier designed primarily for use with low level transducers, including load cells, strain gauges and pressure transducers. An outstanding combination of low noise, high gain accuracy, low gain temperature coefficient and high linearity make the AD624 ideal for use in high resolution data acquisition systems.

The AD624C has an input offset voltage drift of less than $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, output offset voltage drift of less than $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMRR above 80dB at unity gain (130dB at $G=500$) and a maximum nonlinearity of 0.001% at $G=1$. In addition to these outstanding dc specifications the AD624 exhibits superior ac performance as well. A 25MHz gain bandwidth product, $5\text{V}/\mu\text{s}$ slew rate and $15\mu\text{s}$ settling time permit the use of the AD624 in high speed data acquisition applications.

The AD624 does not need any external components for pre-trimmed gains of 1, 100, 200, 500 and 1000. Additional gains such as 250 and 333 can be programmed within one percent accuracy with external jumpers. A single external resistor can also be used to set the 624's gain to any value in the range of 1 to 10,000.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD624 offers outstanding noise performance. Input noise is typically less than $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1kHz.
2. The AD624 is a functionally complete instrumentation amplifier. Pin programmable gains of 1, 100, 200, 500 and 1000 are provided on the chip. Other gains are achieved through the use of a single external resistor.
3. The offset voltage, offset voltage drift, gain accuracy and gain temperature coefficients are guaranteed for all pre-trimmed gains.
4. The AD624 provides totally independent input and output offset nulling terminals for high precision applications. This minimizes the effect of offset voltage in gain ranging applications.
5. A sense terminal is provided to enable the user to minimize the errors induced through long leads. A reference terminal is also provided to permit level shifting at the output.

AD624—SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15V$, $R_L = 2k\Omega$ and $T_A = +25^\circ C$ unless otherwise specified)

Model	AD624A			AD624B			AD624C			AD624S			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN													
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			
Gain Range (Pin Programmable)	1 to 1000			1 to 1000			1 to 1000			1 to 1000			
Gain Error													
G = 1			± 0.05			± 0.03			± 0.02			± 0.05	%
G = 100			± 0.25			± 0.15			± 0.1			± 0.25	%
G = 200, 500			± 0.5			± 0.35			± 0.25			± 0.5	%
G = 1000			± 1.0			± 1.0			± 1.0			± 1.0	%
Nonlinearity													
G = 1			± 0.005			± 0.003			± 0.001			± 0.005	%
G = 100, 200			± 0.005			± 0.003			± 0.001			± 0.005	%
G = 500, 1000			± 0.005			± 0.005			± 0.005			± 0.005	%
Gain vs. Temperature													
G = 1			5			5			5			5	ppm/°C
G = 100, 200			10			10			10			10	ppm/°C
G = 500, 1000			25			15			15			15	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)													
Input Offset Voltage vs. Temperature			200			75			25			75	μV
Output Offset Voltage vs. Temperature			2			0.5			0.25			2.0	$\mu V/^\circ C$
Offset Referred to the Input vs. Supply			5			3			2			3	mV
G = 1			70			75			80			75	dB
G = 100, 200			95			105			110			105	dB
G = 500, 1000			100			110			115			110	dB
INPUT CURRENT													
Input Bias Current vs. Temperature			± 50			± 25			± 15			± 50	nA
Input Offset Current vs. Temperature			± 50			± 25			± 10			± 50	pA/°C
Input Offset Current vs. Temperature			± 20			± 15			± 10			± 35	nA
INPUT													
Input Impedance													Ω
Differential Resistance			10^9			10^9			10^9			10^9	Ω
Differential Capacitance			10			10			10			10	pF
Common-Mode Resistance			10^9			10^9			10^9			10^9	Ω
Common-Mode Capacitance			10			10			10			10	pF
Input Voltage Range ¹			± 10			± 10			± 10			± 10	V
Max Differ. Input Linear (V_{DL})			± 10			± 10			± 10			± 10	V
Max Common-Mode Linear (V_{CML})			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$	V
Common-Mode Rejection dc to 60Hz with 1k Ω Source Imbalance													dB
G = 1			70			75			80			70	dB
G = 100, 200			100			105			110			100	dB
G = 500, 1000			110			120			130			110	dB
OUTPUT RATING													
V_{OUT} , $R_L = 2k\Omega$			± 10			± 10			± 10			± 10	V
DYNAMIC RESPONSE													
Small Signal - 3dB													
G = 1			1			1			1			1	MHz
G = 100			150			150			150			150	kHz
G = 200			100			100			100			100	kHz
G = 500			50			50			50			50	kHz
G = 1000			25			25			25			25	kHz
Slew Rate			5.0			5.0			5.0			5.0	V/ μs
Settling Time to 0.01%, 20V Step													
G = 1 to 200			15			15			15			15	μs
G = 500			35			35			35			35	μs
G = 1000			75			75			75			75	μs
NOISE													
Voltage Noise, 1kHz													
R.T.I.			4			4			4			4	nV/\sqrt{Hz}
R.T.O.			75			75			75			75	nV/\sqrt{Hz}
R.T.I., 0.1 to 10Hz													
G = 1			10			10			10			10	μV p-p
G = 100			0.3			0.3			0.3			0.3	μV p-p
G = 200, 500, 1000			0.2			0.2			0.2			0.2	μV p-p
Current Noise													
0.1Hz to 10Hz			60			60			60			60	pA p-p
SENSE INPUT													
R_{IN}			8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	$k\Omega$
I_{IN}													μA
Voltage Range			± 10			± 10			± 10			± 10	V
Gain to Output			1			1			1			1	%
REFERENCE INPUT													
R_{IN}			16	20	24	16	20	24	16	20	24	16	$k\Omega$
I_{IN}													μA
Voltage Range			± 10			± 10			± 10			± 10	V
Gain to Output			1			1			1			1	%

Model	AD624A			AD624B			AD624C			AD624S			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TEMPERATURE RANGE													
	Specified Performance												
POWER SUPPLY													
	Quiescent Current												
PACKAGE OPTION ²	AD624AD			AD624BD			AD624CD			AD624SD, AD624SD/883B			
Chips Available	AD624AChips									AD624SChips			

NOTES

¹V_{DI} is the maximum differential input voltage at G = 1 for specified nonlinearity. V_{DI} at other gains = 10V/G. V_{DI} = actual differential input voltage. Example: G = 10, V_{DI} = 0.50.

V_{CM} = 12V - (10.2 × 0.50V) = 9.5V

²For outline information see Package Information section.

Specifications subject to change without notice.

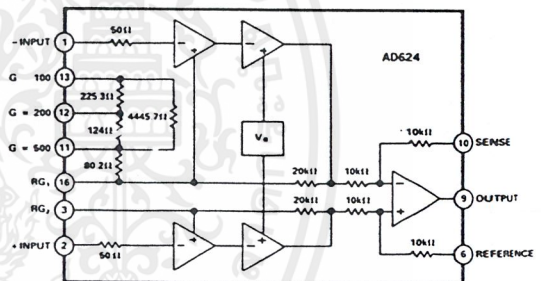
Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

- Supply Voltage ± 18V
- Internal Power Dissipation 420mW
- Input Voltage ± V_S
- Differential Input Voltage ± V_S
- Output Short Circuit Duration Indefinite
- Storage Temperature Range -65°C to +150°C
- Operating Temperature Range
 - AD624A/B/C -25°C to +85°C
 - AD624S -55°C to +175°C
- Lead Temperature (Soldering, 60secs) +300°C

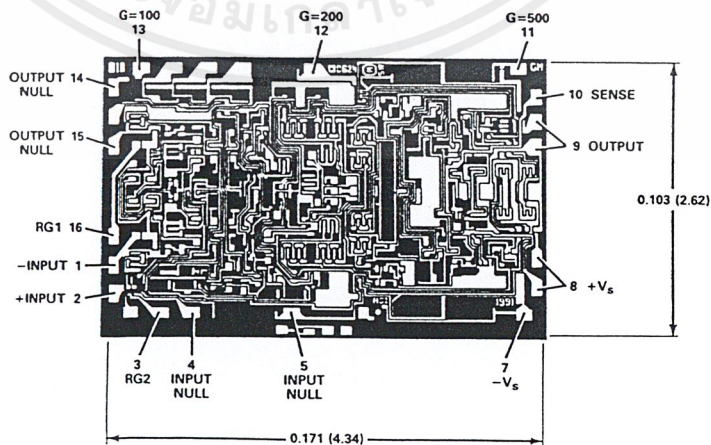
*Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



METALIZATION PHOTOGRAPH

Contact factory for latest dimensions.
Dimensions shown in inches and (mm).



AD624—Typical Characteristics

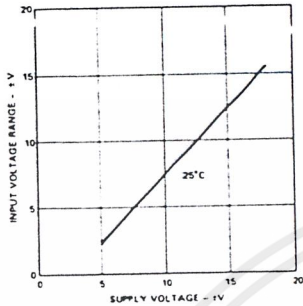


Figure 1. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, $G = 1$

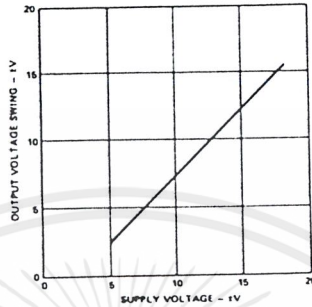


Figure 2. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

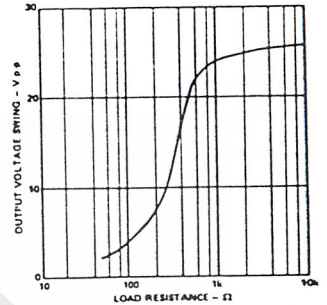


Figure 3. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

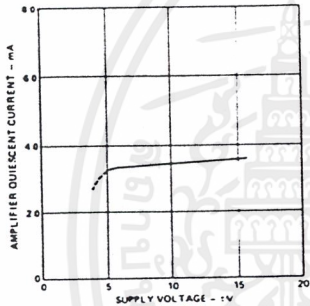


Figure 4. Quiescent Current vs. Supply Voltage

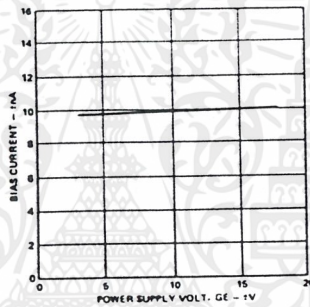


Figure 5. Input Bias Current vs. Supply Voltage

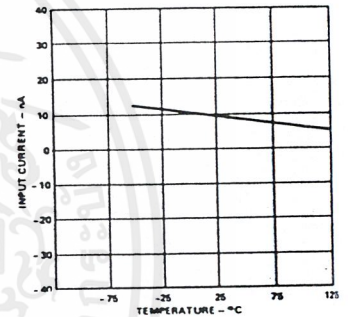


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

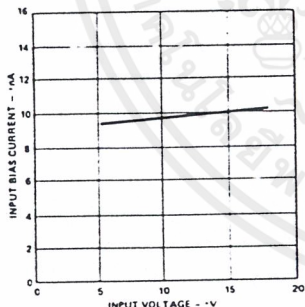


Figure 7. Input Bias Current vs. CMV

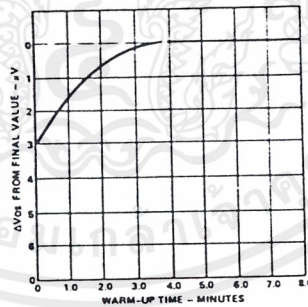


Figure 8. Offset Voltage, RTI, Turn On Drift

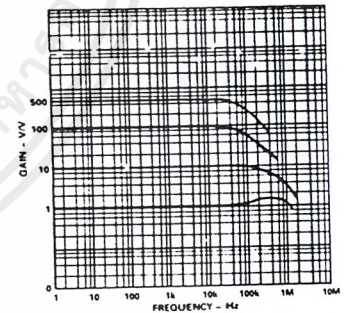


Figure 9. Gain vs. Frequency

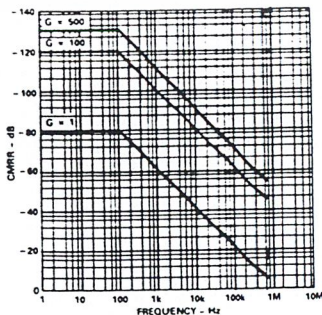


Figure 10. CMRR vs. Frequency RTI, Zero to 1k Source Imbalance

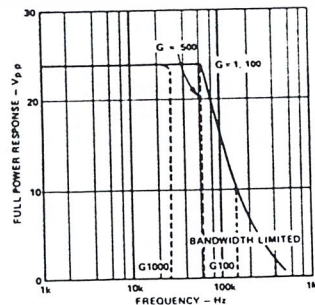


Figure 11. Large Signal Frequency Response

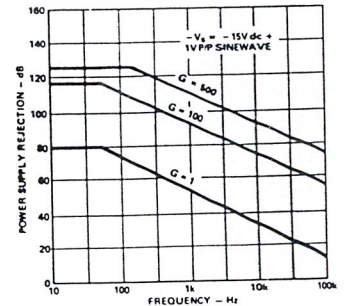


Figure 12. Positive PSRR vs. Frequency

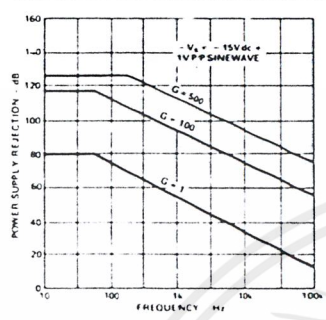


Figure 13. Negative PSRR vs. Frequency

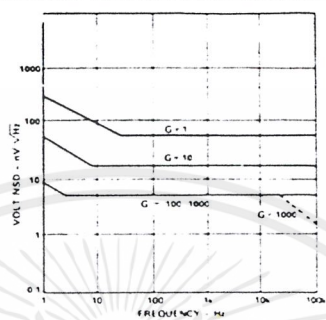


Figure 14. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

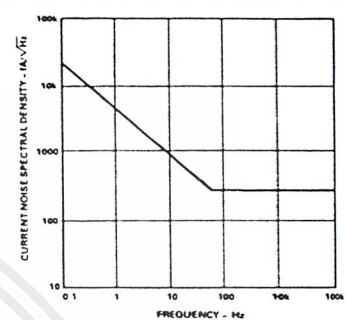


Figure 15. Input Current Noise

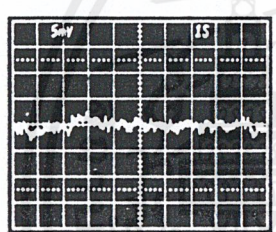


Figure 16. Low Frequency Voltage Noise - G = 1 (System Gain = 1000)

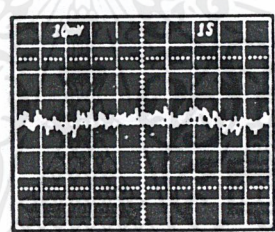


Figure 17. Low Frequency Voltage Noise - G = 1000 (System Gain = 100,000)

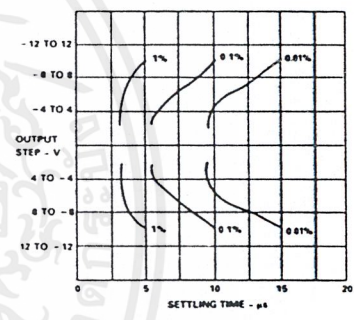


Figure 18. Settling Time Gain = 1

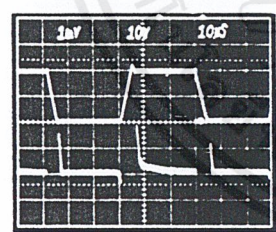


Figure 19. Large Signal Pulse Response and Settling Time - G = 1

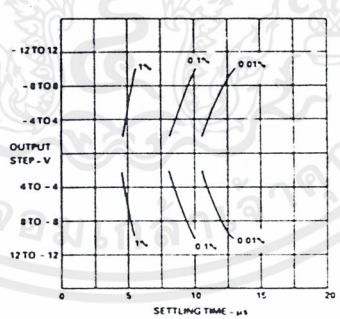


Figure 20. Settling Time Gain = 100

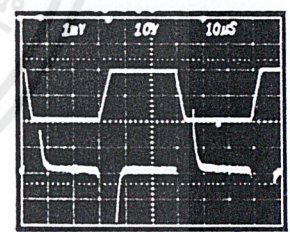


Figure 21. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 100

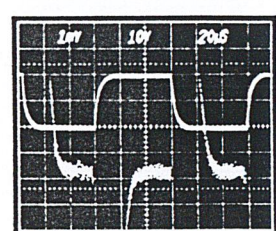


Figure 22. Range Signal Pulse Response and Settling Time G = 500

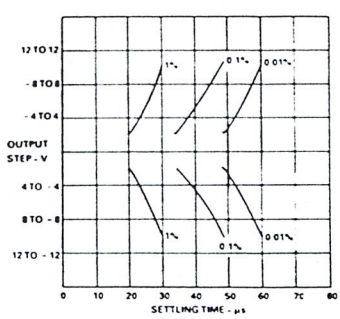


Figure 23. Settling Time Gain = 1000

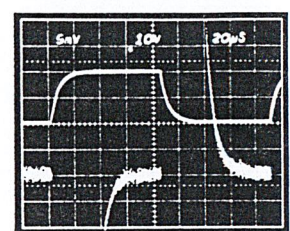


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 1000

AD624

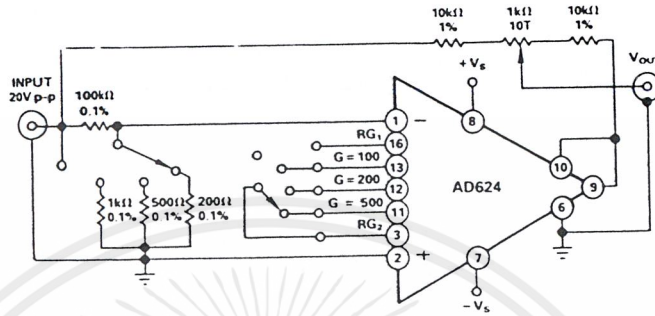


Figure 25. Settling Time Test Circuit

Theory of Operation

The AD624 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three-op-amp instrumentation amplifier. Monolithic construction and laser-wafer-trimming allow the tight matching and tracking of circuit components and the high level of performance that this circuit architecture is capable of.

A preamp section (Q1–Q4) develops the programmed gain by the use of feedback concepts. Feedback from the outputs of A1 and A2 forces the collector currents of Q1–Q4 to be constant thereby impressing the input voltage across R_G .

The gain is set by choosing the value of R_G from the equation, $\text{Gain} = \frac{40k}{R_G} + 1$. The value of R_G also sets the transconductance of the input preamp stage increasing it asymptotically to the transconductance of the input transistors as R_G is reduced for larger gains. This has three important advantages. First, this approach allows the circuit to achieve a very high open loop gain of 3×10^8 at a programmed gain of 1000 thus reducing gain related errors to a negligible 3ppm. Second, the gain bandwidth product which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of $4nV/\sqrt{\text{Hz}}$ at $G \geq 500$.

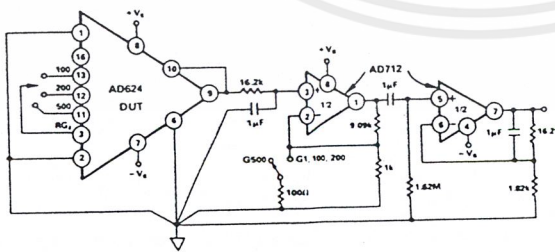


Figure 26. Noise Test Circuit

INPUT CONSIDERATIONS

Under input overload conditions the user will see $R_G + 100\Omega$ and two diode drops ($\sim 1.2V$) between the plus and minus inputs, in either direction. If safe overload current under all conditions is assumed to be 10mA, the maximum overload voltage is $\sim \pm 2.5V$. While the AD624 can withstand this continuously, momentary overloads of $\pm 10V$ will not harm the device. On the other hand the inputs should never exceed the supply voltage.

The ADS24 should be considered in applications that require protection from severe input overload. If this is not possible, external protection resistors can be put in series with the inputs of the AD624 to augment the internal (50Ω) protection resistors. This will most seriously degrade the noise performance. For this reason the value of these resistors should be chosen to be as low as possible and still provide 10mA of current limiting under maximum continuous overload conditions. In selecting the value of these resistors, the internal gain setting resistor and the 1.2 volt drop need to be considered. For example, to protect the device from a continuous differential overload of 20V at a gain of 100, $1.9k\Omega$ of resistance is required. The internal gain resistor is $40k\Omega$; the internal protect resistor is 100Ω . There is a 1.2V drop across D1 or D2 and the base-emitter junction of either Q1 and Q3 or Q2 and Q4 as shown in Figure 27, 1400Ω of external resistance would be required (700Ω in series with each input). The RTI noise in this case would be $\sqrt{4KTR_{ext} + (4nV/\sqrt{\text{Hz}})^2} = 6.2nV/\sqrt{\text{Hz}}$.

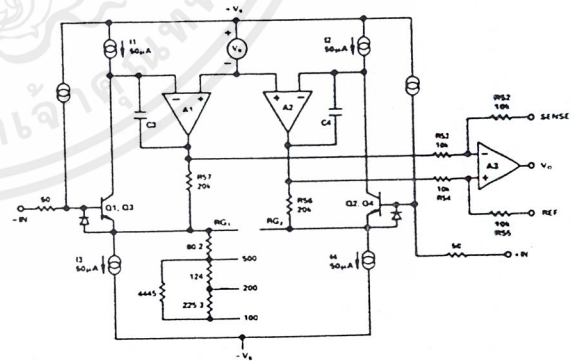


Figure 27. Simplified Circuit of Amplifier; Gain is Defined as $((R56 + R57)(R_G) + 1)$. For a Gain of 1, R_G is an Open Circuit.

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

Voltage offset specifications are often considered a figure of merit for instrumentation amplifiers. While initial offset may be adjusted to zero, shifts in offset voltage due to temperature variations will cause errors. Intelligent systems can often correct for this factor with an auto-zero cycle, but there are many small-signal high-gain applications that don't have this capability.

Voltage offset and offset drift each have two components; input and output. Input offset is that component of offset that is

Applying the AD624

directly proportional to gain i.e., input offset as measured at the output at $G = 100$ is 100 times greater than at $G = 1$. Output offset is independent of gain. At low gains, output offset drift is dominant, while at high gains input offset drift dominates. Therefore, the output offset voltage drift is normally specified as drift at $G = 1$ (where input effects are insignificant), while input offset voltage drift is given by drift specification at a high gain (where output offset effects are negligible). All input-related numbers are referred to the input (RTI) which is to say that the effect on the output is "G" times larger. Voltage offset vs. power supply is also specified at one or more gain settings and is also RTI.

By separating these errors, one can evaluate the total error independent of the gain setting used. In a given gain configuration both errors can be combined to give a total error referred to the input (R.T.I.) or output (R.T.O.) by the following formula:

$$\begin{aligned} \text{Total Error R.T.I.} &= \text{input error} + (\text{output error}/\text{gain}) \\ \text{Total Error R.T.O.} &= (\text{Gain} \times \text{input error}) + \text{output error} \end{aligned}$$

As an illustration, a typical AD624 might have a $+250\mu\text{V}$ output offset and a $-50\mu\text{V}$ input offset. In a unity gain configuration, the total output offset would be $200\mu\text{V}$ or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be -4.75mV or: $+250\mu\text{V} + 100(-50\mu\text{V}) = -4.75\text{mV}$.

The AD624 provides for both input and output offset adjustment. This optimizes nulling in very high precision applications and minimizes offset voltage effects in switched gain applications. In such applications the input offset is adjusted first at the highest programmed gain, then the output offset is adjusted at $G = 1$.

GAIN

The AD624 includes high accuracy pre-trimmed internal gain resistors. These allow for single connection programming of gains of 1, 100, 200 and 500. Additionally, a variety of gains including a pre-trimmed gain of 1000 can be achieved through series and parallel combinations of the internal resistors. Table I shows the available gains and the appropriate pin connections and gain temperature coefficients.

The gain values achieved via the combination of internal resistors are extremely useful. The temperature coefficient of the gain is dependent primarily on the mismatch of the temperature coefficients of the various internal resistors. Tracking of these resistors is extremely tight resulting in the low gain TC's shown in Table I.

If the desired value of gain is not attainable using the internal resistors, a single external resistor can be used to achieve any gain between 1 and 10,000. This resistor connected between

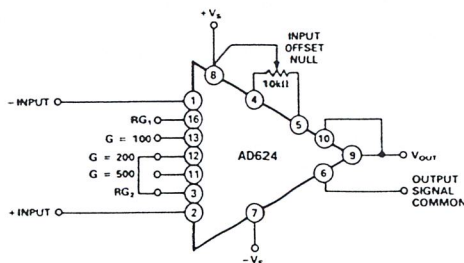


Figure 28. Operating Connections for $G = 200$

Gain (Nominal)	Temperature Coefficient (Nominal)	Pin 3 to Pin	Connect Pins
1	-0ppm/°C	-	-
100	-1.5ppm/°C	13	-
125	-5ppm/°C	13	11 to 16
137	-5.5ppm/°C	13	11 to 12
186.5	-6.5ppm/°C	13	11 to 12 to 16
200	-3.5ppm/°C	12	-
250	-5.5ppm/°C	12	11 to 13
333	-15ppm/°C	12	11 to 16
375	-0.5ppm/°C	12	13 to 16
500	-10ppm/°C	11	-
624	-5ppm/°C	11	13 to 16
688	-1.5ppm/°C	11	11 to 12; 13 to 16
831	+4ppm/°C	11	16 to 12
1000	0ppm/°C	11	16 to 12; 13 to 11

Table I.

pins 3 and 16 programs the gain according to the formula $R_G = \frac{40k}{G-1}$ (see Figure 29). For best results R_G should be a precision resistor with a low temperature coefficient. An external R_G affects both gain accuracy and gain drift due to the mismatch between it and the internal thin-film resistors R56 and R57. Gain accuracy is determined by the tolerance of the external R_G and the absolute accuracy of the internal resistors ($\pm 20\%$). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of R_G and the temperature coefficient of the internal resistors ($-15\text{ppm}/^\circ\text{C}$ typ), and the temperature coefficient of the internal interconnections.

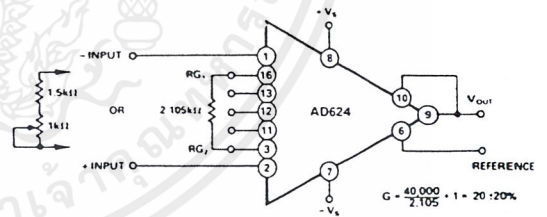


Figure 29. Operating Connections for $G = 20$

The AD624 may also be configured to provide gain in the output stage. Figure 30 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD624. The values of R1, R2 and R3 should be selected to be as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R2 will precisely set the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R1 and R3.

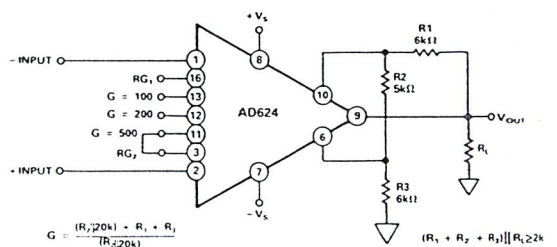


Figure 30. Gain of 2500

AD624

NOISE

The AD624 is designed to provide noise performance near the theoretical noise floor. This is an extremely important design criteria as the front end noise of an instrumentation amplifier is the ultimate limitation on the resolution of the data acquisition system it is being used in. There are two sources of noise in an instrument amplifier, the input noise, predominantly generated by the differential input stage, and the output noise, generated by the output amplifier. Both of these components are present at the input (and output) of the instrumentation amplifier. At the input, the input noise will appear unaltered; the output noise will be attenuated by the closed loop gain (at the output, the output noise will be unaltered; the input noise will be amplified by the closed loop gain). Those two noise sources must be root sum squared to determine the total noise level expected at the input (or output).

The low frequency (0.1 to 10Hz) voltage noise due to the output stage is $10\mu\text{V}$ p-p, the contribution of the input stage is $0.2\mu\text{V}$ p-p. At a gain of 10, the RTI voltage noise would be $1\mu\text{V}$ p-p, $\sqrt{\frac{10^{-2}}{G} + (0.2)^2}$. The RTO voltage noise would be $10.2\mu\text{V}$ p-p, $\sqrt{10^2 + (0.2(G))^2}$. These calculations hold for applications using either internal or external gain resistors.

INPUT BIAS CURRENTS

Input bias currents are those currents necessary to bias the input transistors of a dc amplifier. Bias currents are an additional source of input error and must be considered in an total error budget. The bias currents when multiplied by the source resistance imbalance appear as an additional offset voltage. (What is of concern in calculating bias current errors is the change in bias current with respect to signal voltage and temperature.) Input offset current is the difference between the two input bias currents. The effect of offset current is an input offset voltage whose magnitude is the offset current times the source resistance.

Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents will charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore, when amplifying "floating" input sources such as transformers and thermocouples, as well as ac-coupled sources, there must still be a dc path from each input to ground, (see Figure 31).

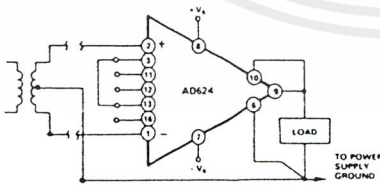


Figure 31a. Transformer Coupled

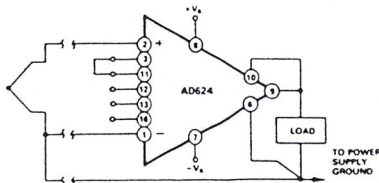


Figure 31b. Thermocouple

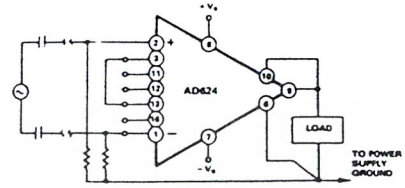


Figure 31c. AC Coupled

Figure 31. Indirect Ground Returns for Bias Currents

COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed by equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance. "Common-Mode Rejection Ratio" (CMRR) is a ratio expression while "Common-Mode Rejection" (CMR) is the logarithm of that ratio. For example, a CMRR of 10,000 corresponds to a CMR of 80dB.

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common-mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figures 32 and 33 shows active data guards which are configured to improve ac common-mode rejection by "bootstrapping" the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

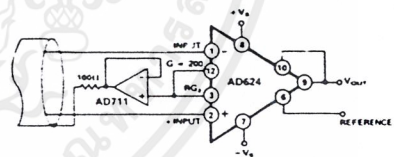


Figure 32. Shield Driver, $G = 100$

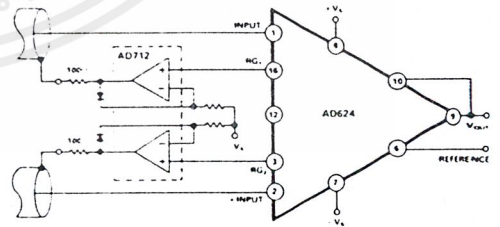


Figure 33. Differential Shield Driver

GROUNDING

Many data-acquisition components have two or more ground pins which are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, since current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and since these paths have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data acquisition components. Separate ground returns should be provided to

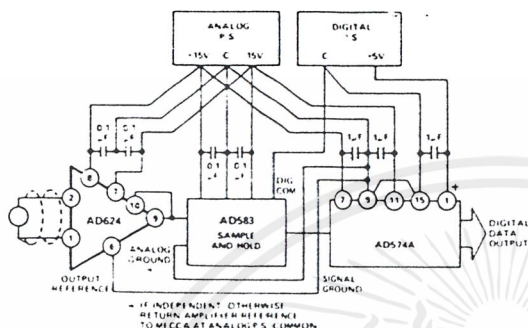


Figure 34. Basic Grounding Practice

minimize the current flow in the path from the most sensitive points to the system ground point. In this way supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors (see Figure 34).

Since the output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal an instrumentation amplifier can solve many grounding problems.

SENSE TERMINAL

The sense terminal is the feedback point for the instrument amplifier's output amplifier. Normally it is connected to the instrument amplifier output. If heavy load currents are to be drawn through long leads, voltage drops due to current flowing through lead resistance can cause errors. The sense terminal can be wired to the instrument amplifier at the load thus putting the $I \times R$ drops "inside the loop" and virtually eliminating this error source.

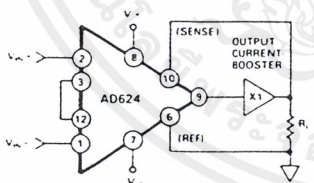


Figure 35. AD624 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 volt output swing into $2k\Omega$. In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 35 shows how a current booster may be connected "inside the loop" of an instrumentation amplifier to provide the required current without significantly degrading overall performance. The effects of nonlinearities, offset and gain inaccuracies of the buffer are reduced by the loop gain of the IA output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal may be used to offset the output by up to $\pm 10V$. This is useful when the load is "floating" or does not share a ground with the rest of the system. It also provides a direct means of injecting a precise offset. It must be remembered that the total output swing is ± 10 volts, from ground, to be shared between signal and reference offset.

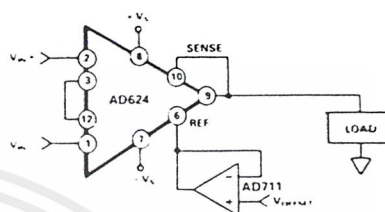


Figure 36. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

When the IA is of the three-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal. Any significant resistance, including those caused by PC layouts or other connection techniques, which appears between the reference pin and ground will increase the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the IA. Inadvertent thermocouple connections created in the sense and reference lines should also be avoided as they will directly affect the output offset voltage and output offset voltage drift.

In the AD624 a reference source resistance will unbalance the CMR trim by the ratio of $10k\Omega/R_{REF}$. For example, if the reference source impedance is 1Ω , CMR will be reduced to 80dB ($10k\Omega/1\Omega = 80dB$). An operational amplifier may be used to provide that low impedance reference point as shown in Figure 36. The input offset voltage characteristics of that amplifier will add directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals as shown in Figure 37.

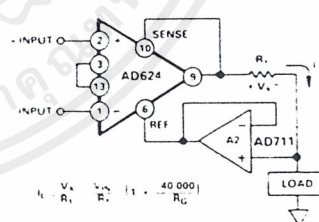


Figure 37. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the "low" side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain and the value of that resistor. Since only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier A_2 , the forced current I_L will largely flow through the load. Offset and drift specifications of A_2 must be added to the output offset and drift specifications of the IA.

PROGRAMMABLE GAIN

Figure 38 shows the AD624 being used as a software programmable gain amplifier. Gain switching can be accomplished with mechanical switches such as DIP switches or reed relays. It should be noted that the "on" resistance of the switch in series with the internal gain resistor becomes part of the gain equation and will have an effect on gain accuracy.

4

AD624

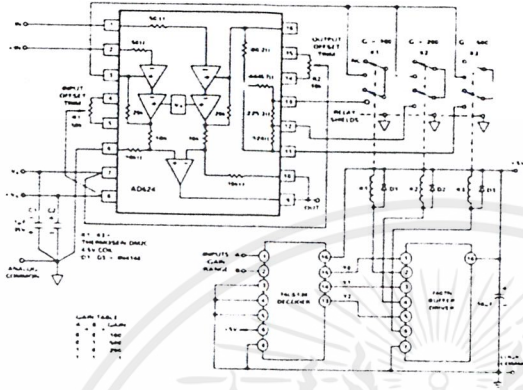


Figure 38. Gain Programmable Amplifier

A significant advantage in using the internal gain resistors in a programmable gain configuration is the minimization of thermocouple signals which are often present in multiplexed data acquisition systems.

If the full performance of the AD624 is to be achieved, the user must be extremely careful in designing and laying out his circuit to minimize the remaining thermocouple signals.

The AD624 can also be connected for gain in the output stage. Figure 39 shows an AD547 used as an active attenuator in the output amplifier's feedback loop. The active attenuation presents a very low impedance to the feedback resistors therefore minimizing the common-mode rejection ratio degradation.

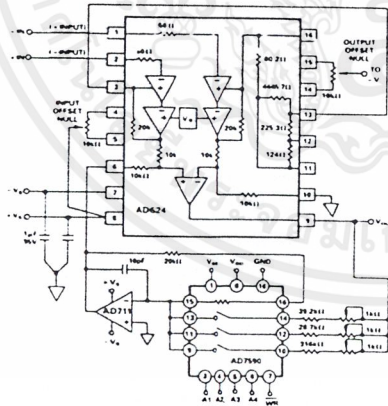


Figure 39. Programmable Output Gain

Another method for developing the switching scheme is to use a DAC. The AD7528 dual DAC which acts essentially as a pair of switched resistive attenuators having high analog linearity and symmetrical bipolar transmission is ideal in this application. The multiplying DAC's advantage is that it can handle inputs of either polarity or zero without affecting the programmed gain. The circuit shown uses an AD7528 to set the gain (DAC A) and to perform a fine adjustment (DAC B).

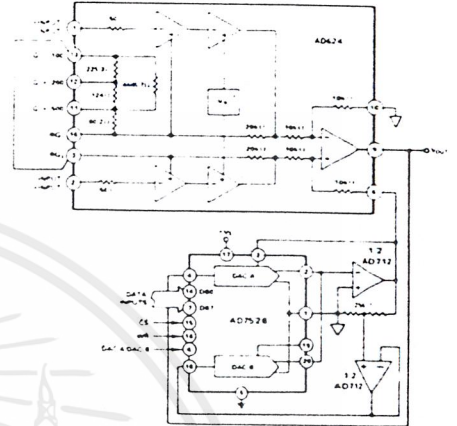


Figure 40. Programmable Output Gain Using a DAC

AUTO-ZERO CIRCUITS

In many applications it is necessary to provide very accurate data in high gain configurations. At room temperature the offset effects can be nulled by the use of offset trim pots. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 41 shows a CMOS DAC operating in the bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

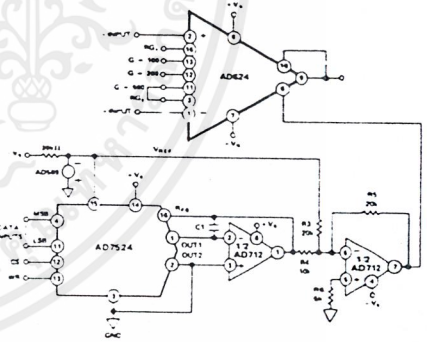


Figure 41. Software Controllable Offset

In many applications complex software algorithms for auto-zero applications are not available. For these applications Figure 42 provides a hardware solution.

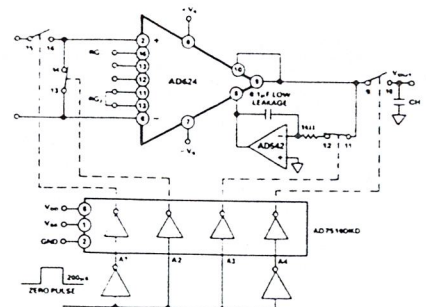


Figure 42. Auto-Zero Circuit

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 43 includes both auto-zero and auto-gain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The auto-zero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8 bit) to the AD7524 which eliminates the zero error since its output has an inverted scale. The auto-gain cycle converts the A/D reference and compares it with full scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

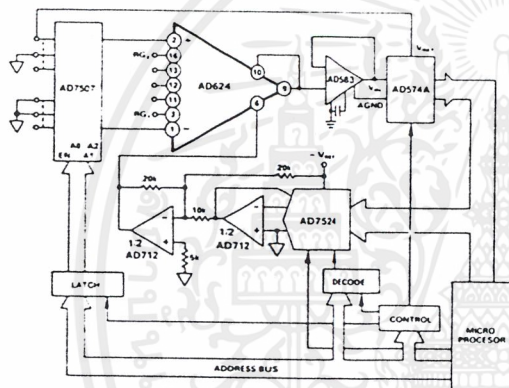


Figure 43. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

WEIGH SCALE

Figure 44 shows an example of how an AD624 can be used to condition the differential output voltage from a load cell. The 10% reference voltage adjustment range is required to accommodate the 10% transducer sensitivity tolerance. The high linearity and low noise of the AD624 make it ideal for use in applications of this type particularly where it is desirable to measure small changes in weight as opposed to the absolute value. The addition of an auto gain auto tare cycle will enable the system to remove offsets, gain errors, and drifts making possible true 14-bit performance.

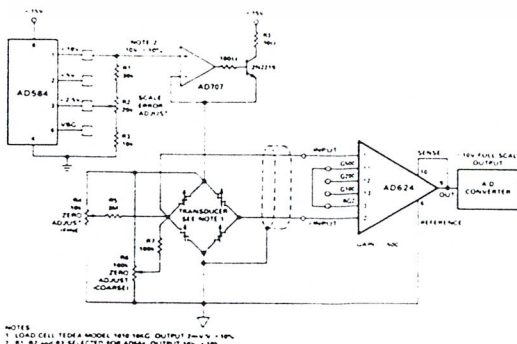


Figure 44. AD624 Weigh Scale Application

AC BRIDGE

Bridge circuits which use dc excitation are often plagued by errors caused by thermocouple effects, 1/f noise, dc drifts in the electronics, and line noise pick-up. One way to get around these problems is to excite the bridge with an ac waveform, amplify the bridge output with an ac amplifier, and synchronously demodulate the resulting signal. The ac phase and amplitude information from the bridge is recovered as a dc signal at the output of the synchronous demodulator. The low frequency system noise, dc drifts, and demodulator noise all get mixed to the carrier frequency and can be removed by means of a low pass filter. Dynamic response of the bridge must be traded off against the amount of attenuation required to adequately suppress these residual carrier components in the selection of the filter.

Figure 45 is an example of an ac bridge system with the AD630 used as a synchronous demodulator. The oscilloscope photograph shows the results of a 0.05% bridge imbalance caused by the 1Meg resistor in parallel with one leg of the bridge. The top trace is the bridge excitation, the upper middle trace is the amplified bridge output, the lower-middle trace is the output of the synchronous demodulator and the bottom trace is the filtered dc system output.

This system can easily resolve a 0.5ppm change in bridge impedance. Such a change will produce a 6.3mV change in the low pass filtered dc output, well above the RTO drifts and noise.

The AC-CMRR of the AD624 decreases with the frequency of the input signal. This is due mainly to the package-pin capacitance associated with the AD624's internal gain resistors. If AC-CMRR is not sufficient for a given application, it can be trimmed by using a variable capacitor connected to the amplifier's RG₂ pin as shown in Figure 45.

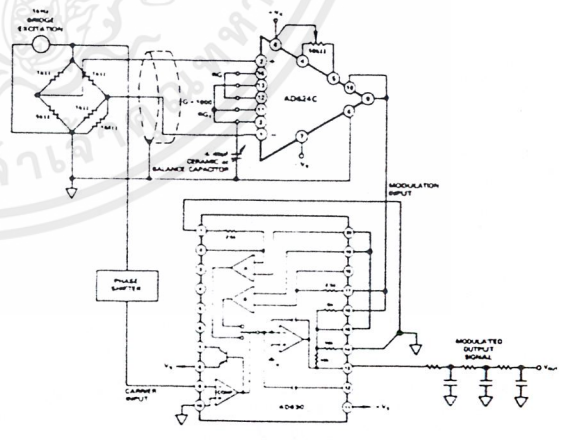


Figure 45. AC Bridge

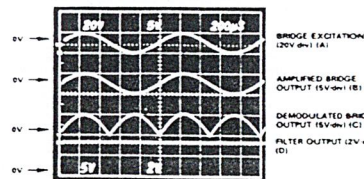


Figure 46. AC Bridge Waveforms

AD624

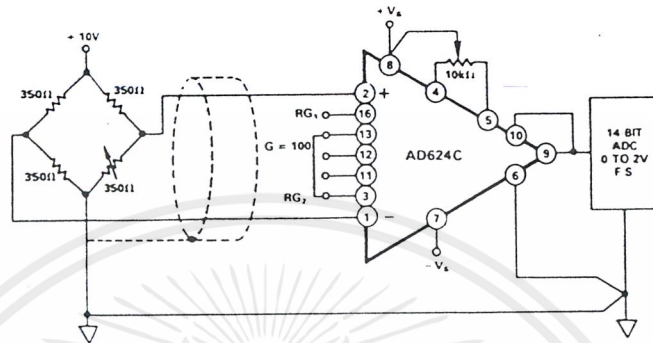


Figure 47. Typical Bridge Application

ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, we will now examine a typical case where an AD624 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 47 shows a differential transducer, unbalanced by $\approx 5\Omega$, supplying a 0 to 20mV signal to an AD624. The output of the IA feeds a 14-bit A to D converter with a 0 to 2 volt input voltage range. The operating temperature range is -25°C to $+85^\circ\text{C}$. Therefore, the largest change in temperature ΔT within the operating range is from ambient to $+85^\circ\text{C}$ ($85^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance. This would be so in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (20ppm = 0.002%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the A to D output, the addition of a auto-gain/auto-zero cycle will remove all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This will also reduce errors to 0.002%.

Error Source	AD624 Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 25^\circ\text{C}$	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 85^\circ\text{C}$	Effect on Resolution
Gain Error	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\% = 1000\text{ppm}$	1000ppm	1000ppm	-
Gain Instability	10ppm	$(10\text{ppm}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 600\text{ppm}$	-	600ppm	-
Gain Nonlinearity	$\pm 0.001\%$	$\pm 0.001\% = 10\text{ppm}$	-	-	10ppm
Input Offset Voltage	$\pm 25\mu\text{V}$, RTI	$\pm 25\mu\text{V}/20\text{mV} = \pm 1250\text{ppm}$	1250ppm	1250ppm	-
Input Offset Voltage Drift	$\pm 0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 15\mu\text{V}$ $15\mu\text{V}/20\text{mV} = 750\text{ppm}$	-	750ppm	-
Output Offset Voltage ¹	$\pm 2.0\text{mV}$	$\pm 2.0\text{mV}/20\text{mV} = 1000\text{ppm}$	1000ppm	1000ppm	-
Output Offset Voltage Drift ¹	$\pm 10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 10\mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 600\mu\text{V}$ $600\mu\text{V}/20\text{mV} = 300\text{ppm}$	-	300ppm	-
Bias Current – Source Imbalance Error	$\pm 15\text{nA}$	$(\pm 15\text{nA})(5\Omega) = 0.075\mu\text{V}$ $0.075\mu\text{V}/20\text{mV} = 3.75\text{ppm}$	3.75ppm	3.75ppm	-
Offset Current – Source Imbalance Error	$\pm 10\text{nA}$	$(\pm 10\text{nA})(5\Omega) = 0.050\mu\text{V}$ $0.050\mu\text{V}/20\text{mV} = 2.5\text{ppm}$	2.5ppm	2.5ppm	-
Offset Current – Source Resistance – Error	$\pm 10\text{nA}$	$(10\text{nA})(175\Omega) = 1.75\mu\text{V}$ $1.75\mu\text{V}/20\text{mV} = 87.5\text{ppm}$	87.5ppm	87.5ppm	-
Offset Current – Source Resistance – Drift	$\pm 100\text{pA}/^\circ\text{C}$	$(100\text{pA}/^\circ\text{C})(175\Omega)(60^\circ\text{C}) = 1\mu\text{V}$ $1\mu\text{V}/20\text{mV} = 50\text{ppm}$	-	50ppm	-
Common Mode Rejection 5V dc	115dB	$115\text{dB} = 1.8\text{ppm} \times 5\text{V} = 9\mu\text{V}$ $9\mu\text{V}/20\text{mV} = 444\text{ppm}$	450ppm	450ppm	-
Noise, RTI (0.1–10Hz)	$0.22\mu\text{V}$ p-p	$0.22\mu\text{V}$ p-p/ $20\text{mV} = 10\text{ppm}$	-	-	10ppm
Total Error			3793.75ppm	5493.75ppm	20ppm

¹Output offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

Table II. Error Budget Analysis of AD624CD in Bridge Application

For a comprehensive study of instrumentation amplifier design and applications, refer to the Instrumentation Amplifier Application Guide, available free from Analog Devices.

หนังสืออ้างอิง

1. Jha A.R., "Superconductor Technology", New York : John Wiley & Sons, 1998
2. Kresin V.Z. and Wolf S.A., "Fundamentals of Superconductivity", New York : Plenum Press, 1990
3. Tilley D.R. and Tilley J., "Superfluidity and Superconductivity", Bristol and Boston : Adam Hilser Ltd, 1986
4. Terry.P.Orlando and Kevin A. Oelin, "Foundation of Applied Superconductivity", 1991
5. V.Daniel Hunt, "Superconductivity Source Book", 1989
6. ดุลยวัจน์ จอมแสง, " การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง แบบ $Yb_{a_2}Cu_3O_{7-x}W$ ", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535
7. ชบา ชมภูพงษ์, "การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด เซรามิก", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538
8. สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร, "การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสตีฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
9. ดำรง มณีพงษ์สวัสดิ์, "ฟิสิกส์ของแข็ง2", แสงจันทร์การพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2514