

การศึกษาโจเซฟสันชนิดบริดจ์ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

A STUDY OF BRIDGE TYPE HIGH- T_c SUPERCONDUCTING JOSEPHSON

ไมตรี สรathomกรอด

MAITREE SRATHONGROD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-924-655-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาโจเซฟสันชนิดบริดจ์ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

A STUDY OF BRIDGE TYPE HIGH- T_c SUPERCONDUCTING JOSEPHSON



ไมตรี สระทองรอด

MAITREE SRATHONGROD

เลขหน้.....
เลขทระบ้ชน...47661
วัน, เดือน, ปี...21 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย




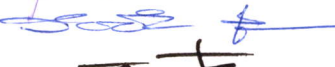

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-656-8

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโจเซฟสันชนิดบริดจ์ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง
A STUDY BRIDGE TYPE HIGH-T_c SUPERCONDUCTING JOSEPHSON
ชื่อนักศึกษา นายไมตรี สระทองรอด
รหัสประจำตัว 41061128
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ประภากร	สุวรรณะ	
รศ.จิรวัดน์	ปานกลาง	
ผศ.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
รศ.ดร.วันชัย	วีรจจา	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 เมษายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๐.....เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ.....๒๕๔๘

จากคุณสมบัติที่น่าสนใจข้างต้น ได้นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ไปประยุกต์เข้าเข้ากับวงจร
วิทสโตนบริดจ์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ ที่สามารถตรวจสอบได้ทั้งขนาดและ
ขั้วของสนามแม่เหล็ก ซึ่งตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ต่ำสุด 0.125 Gauss และกรณีสัญญาณสนาม
แม่เหล็กแบบสลับ จะให้สัญญาณเอาต์พุทกลับเฟส (Out – off Phase) กับสัญญาณอินพุท ซึ่ง
สามารถนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ใช้ใน
การกลับเฟสสัญญาณสนามแม่เหล็กได้

Thesis Title	A Study of Bridge Type High- T_c Superconducting Josephson
Student	Mr. Maitree Srathongrod
Student ID	41061128
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

Bridge type Josephson from $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting material was presented in this thesis. Both of electric and magnetic properties were studied. Moreover this thesis also said the application of the bridge in Wheatstone bridge circuit for detecting magnetic.

From investigation, critical current density (J_c), that is unique property and don't be related to dimension, was about 3.27 A/cm^2 . Resistance and critical current are proportional to bridge length and bridge thickness, respectively. In addition, magnetic resistivity of the bridge type Josephson also related to external magnetic field by linearity. It could response alternative magnetic field in range of 1.3-15 gauss. As shown in the output full-wave rectification, magnetic hysteresis were initially at 16 gauss external magnetic field and were completely at 23 gauss with 2 mV threshold voltage. During time of hysteresis, the bridge was response both of magnitude and pole of magnetic field. Output of hysteresis shown half-wave rectification.

Base on above interesting properties, bridge type Josephson would be applied to Wheatstone bridge circuit for magnetic detector. The detector could detect both of magnitude and pole of magnetic field. Minimum magnetic responsibility was 0.125 gauss. Output and input signal would be out-off phase in alternative magnetic field. We can apply the bridge to be inverter device for magnetic phase converting.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับ เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีมาตลอด ขอขอบพระคุณ ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะ (พี่ห่ม) สำหรับความเป็นห่วงและดูแล น้องวิสิฏฐ์ วงศ์สุทธิธรรม น้องนพดล สิทธิพล และเพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน รวมทั้งคุณอู๋ และคุณจุกจากบัณฑิตศึกษาด้วย ขอขอบคุณทุนการศึกษาจาก มูลนิธิการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ทุนงบประมาณเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาด้วยดี

ท้ายที่สำคัญที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในทุก ๆ สิ่ง ที่ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่น้องทุกคนที่สนับสนุนและมอบให้อย่างมีคุณค่าด้วยดีมาตลอดเวลา

ไมตรี สระทองรอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XII
ศัพท์เทคนิค.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
1.2 วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	4
1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์.....	8
1.4 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ.....	12
1.4.1 ค่าอุณหภูมิวิกฤต.....	12
1.4.2 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต.....	12
1.4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	15
2.1 รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Junction).....	15
2.1.1 ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect).....	15
2.1.2 ชนิดของรอยต่อโจเซฟสัน (Type of Josephson Junction).....	16
2.2 กระแสคงสภาพ.....	18
2.3 ปรากฏการณ์กระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	19
2.4 การจำสภาพแม่เหล็ก.....	20
2.5 วงจรวัดสนามแม่เหล็กแบบวงจรวิทสโตนบริดจ์.....	21
2.5.1 กรณีเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกช่วยให้กระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มี การจำขั้วเหนือ.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	กรณีเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกชั่วเหนือกระทำกับตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดที่มี การจำขั้วเหนือ.....	27
บทที่ 3	การศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์	29
3.1	กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดอุณหภูมิสูง.....	29
3.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	34
3.2.1	การหาค่ากระแสสวิกฤตและค่าความหนาแน่นกระแสสวิกฤตของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์	34
3.2.2	ผลของขนาดของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่มีต่อค่ากระแสสวิกฤต.....	37
3.2.2.1	ผลของความยาวของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่มีต่อค่ากระแสสวิกฤต.....	37
3.2.2.2	ผลของความหนาของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ต่อค่ากระแสสวิกฤต.....	38
3.3	คุณสมบัติทางแม่เหล็ก.....	40
3.3.1	ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์	40
3.3.1.1	ผลของสนามแม่เหล็กคงที่ต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์	40
3.3.1.2	ผลของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์	42
3.3.2	การทดสอบการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์	44
3.3.2.1	เงื่อนไขการเกิดการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์	44
3.3.2.2	ผลของสนามแม่เหล็กคงที่ ที่มีต่อการจำสภาพแม่เหล็กของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์	47
3.3.2.3	ผลของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่มีต่อการจำสภาพ แม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์	50
บทที่ 4	การประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์.....	52
4.1	การตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กคงที่.....	52
4.2	การตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กที่ เปลี่ยนแปลงกับเวลา.....	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การวิเคราะห์การกลับเฟสของห้วงสนามแม่เหล็กแบบวิทส โตนบรีดจ์.....	57
4.3.1 การตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบรีดจ์ ตัวที่ 1 (จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือ).....	57
4.3.2 การตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบรีดจ์ ตัวที่ 2 (จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้).....	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าของ T_c และ H_c สำหรับธาตุต่างๆ.....	5
1.2 ค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารประกอบต่างๆ.....	7
1.3 ค่าวิกฤตสำหรับวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	14
ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของ HEIKE KAMARLINGH ONNES (1911).....	2
1.2 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่า T_c ที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	8
1.3 ปრაกฏการณ์ไมส์เนอร์.....	9
1.4 การลอยตัว.....	10
1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามวิกฤตกับอุณหภูมิ.....	11
1.6 ความสัมพันธ์ของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส.....	13
2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวีคลิงค์ (Weak-Linked Superconductor).....	16
2.2 ปრაกฏการณ์โจเซฟสัน.....	17
2.3 (a) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก ตัดผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	18
(b) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้าน และกระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	18
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เกิด การจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสถานะที่มี การจำสภาพแม่เหล็กภายนอกชั่วเหนือ.....	21
2.6 แสดงแบบจำลองสำหรับการอธิบายหลักการของหัววัดสนามแม่เหล็ก.....	23
2.7 วงจรวิทส โคนบรีดจ์ที่ประยุกต์ใช้กับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสถานะที่มีความจำ.....	24
2.8 วงจรวิทส โคนบรีดจ์ที่ประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก.....	24
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.....	31
3.2 สารประกอบที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง.....	32
3.3 ลักษณะเม็ดสารก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็น โจเซฟสันชนิดบรีดจ์.....	32
3.4 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์.....	33
3.5 โจเซฟสันชนิดบรีดจ์.....	34
3.6 การบัดกรีแบบ 4 ขั้ว(Four Point Probe Measurement).....	35
3.7 วงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน.....	35
3.8 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบรีดจ์.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความยาวต่างๆ กัน.....	37
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความหนาต่างๆ กัน....	38
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตและความหนาของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์	39
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและความหนาของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์	40
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ กัน.....	41
3.14 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง กับเวลา.....	42
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลาของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความถี่ 1 kHz.....	43
3.16 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อม โจเซฟสันชนิดบริดจ์ กับ สนามแม่เหล็กภายนอก.....	45
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก.....	45
3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อม โจเซฟสันชนิดบริดจ์ (V) กับสนามแม่เหล็กภายนอก(B).....	46
3.19 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ขณะที่มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วคราว และผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวและชั่วคราว.....	48
3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อม โจเซฟสันชนิดบริดจ์ กับสนามแม่เหล็กภายนอก ชั่วคราวและชั่วคราว (ในขณะที่โจเซฟสันชนิดบริดจ์ มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วคราว).....	49
3.21 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่อยู่ในสภาวะจำสภาพ แม่เหล็กต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา.....	50
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลาของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็กชั่วคราว ที่ความถี่ 1 kHz.....	50
4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ ต่อสนามแม่เหล็กคงที่.....	53
4.2 ชินสาร โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งชั่วเหนือและชั่วใต้กับแรงดันตกคร่อมวงจรวีทสโตนบริดจ์.....	54
4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวีทสโตนบริดจ์ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชั้น ค่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา.....	55
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทที่สัมพันธ์กับเวลาของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวีทสโตนบริดจ์ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชั้น ที่ความถี่ 1.6 kHz.....	56
4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ตัวที่ 1 ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วเหนือค่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา.....	57
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทที่สัมพันธ์กับเวลา ของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ตัวที่ 1 ที่มีการสภาพแม่เหล็กชั่วเหนือ ที่ความถี่ 200 Hz (a) $V_{in} = 4 \text{ V}$; (B) $V_{in} = 10 \text{ V}$	59
4.8 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วใต้ค่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา.....	60
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุทและเอาต์พุทที่สัมพันธ์กับเวลาของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ตัวที่ 2 ที่มีการสภาพแม่เหล็กชั่วใต้ ที่ความถี่ 200 Hz (a) $V_{in} = 4 \text{ V}$; (B) $V_{in} = 10 \text{ V}$	61
ก-1 เครื่อง Protoble Gauss meter Model HM.201.....	66
ก-2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์	67

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	mm ²
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	Wbm ⁻²
B _a	ความหนาแน่นของฟลักซ์ภายในตัวนำไฟฟ้าที่ยังขด	Wbm ⁻²
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Wb
H _C	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Wb
H ₀	สนามแม่เหล็กที่ศูนย์องศาเคลวิน	Wb
I	กระแส	A
I _C	กระแสวิกฤต	A
J _C	ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Acm ⁻²
R	ความต้านทาน	Ω
T _C	อุณหภูมิวิกฤต	K
Φ	ฟลักซ์แม่เหล็ก	Wb
Φ ₀	ฟลักซ์ควอนตัม	T-m ²

ศัพท์เทคนิค

กระแสคงสภาพ	Persistent Current
กระแสซูเปอร์	Super Current
กระแสตรง	Direct Current
กระแสพื้นผิว	Surface Current
กระแสไบอัส	Biasing Current
กระแสสลับ	Alternative Current
การเชื่อมต่อ	Coupling
การลอยตัว	Levitation
ขอบเขตเกรน	Intergrain
ควอนตัมระดับมหภาค	Macroscopic Quantum State
ความต้านทานไฟฟ้า	Resistance
ความหนาแน่นกระแส	Critical Current
ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Critical Current Density
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxides
เครื่องบันทึกสองแกน	X-Y Recorder
โครงสร้างของแลตทิส	Lattice Structure
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวีคลิงก์	Weak-Linked Superconductor
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
บริดจ์	Bridge
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์กระแสคงสภาพ	Persistent Current
ปรากฏการณ์โจเซฟสัน	Josephson Effect
ปรากฏการณ์เชิงกลทางควมดัม	Quantum Mechanical Phenomenon
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน	Tunneling Effect
ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	Meissner Effect
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แม่เหล็กไดอาแบบสมบูรณ์	Perfect Diamagnetic

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

แม่เหล็กพารา	Paramagnetic
แม่เหล็กเฟอร์โร	Ferromagnetic
รอยต่อโจเซฟสัน	Josephson Junction
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
วีคลิงก์	Weak Link
สควิด	Superconductor Quantum Interference Devices
สนามแม่เหล็ก	Magnetic Field
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Field
สภาพต้านทาน	Resistivity
สภาพนำไฟฟ้า	Conductance
สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductivity
สภาพไร้ต้านทาน	Zero Resistance
แหล่งกำเนิดกระแส	Current Source
แหล่งกำเนิดแรงดัน	Voltage Source
อิตเทรียมออกไซด์	Yttrium Oxide
อุณหภูมิวิกฤต	Critical Temperature

บทที่ 1

บทนำ

โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะมีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตัวนำไฟฟ้านั้นๆ แต่สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) จะแตกต่างกับตัวนำไฟฟ้าธรรมดา เพราะตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature; T_c) ดังนั้นในขณะนำไฟฟ้าจะสามารถนำไฟฟ้าในปริมาณสูงๆ ได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ดังที่เกิดกับตัวนำธรรมดา ทำให้มีผู้สนใจในการที่จะนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้อย่างกว้างขวาง รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

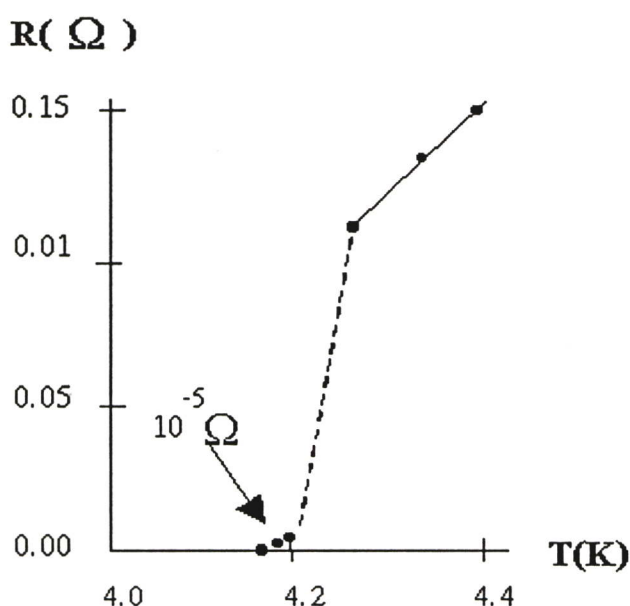
1.1 ความเป็นมาของสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1]

- ค.ศ. 1911 : HEIKE KEMERLING ONNES ค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- ค.ศ. 1935 : WALTER MEISSNER AND R. OCHSENFELD ค้นพบปรากฏการณ์ MEISSNER EFFECT
- ค.ศ. 1935 : 2 พี่น้อง FRITZ AND HEINZ LONDON. ตั้งสมการเพื่ออธิบายการเกิดสภาพตัวนำยิ่งยวด เรียกว่า LONDON EQUATION
- ค.ศ. 1950 : GINZBURG AND LEV LANDAU (RUSSIAN SCIENTIST) อธิบายสภาพตัวนำยิ่งยวด ด้วยสมการ QUANTUM เรียกว่า GINZBURG – LANDAU THEORY
- ค.ศ. 1957 : BCS THEORY ถูกตั้งขึ้นโดย JOHN BARDEEN, LEON COOPER, ROBERT SCHRIEFFER ณ ILLINOIS UNIVERSITY, และทั้ง 3 ได้รับรางวัล NOBEL PRIZE สำหรับทฤษฎีนี้
- ค.ศ. 1957 : ABRIKOSOV (RUSSIAN) ค้นพบ TYPE II SUPERCONDUCTOR ถือเป็นจุดเปิดเทคโนโลยีนำไปสู่การค้นพบสาร HTSC ซึ่งได้แก่ สารตระกูล Nb_3Sn , $NbTi$

ค.ศ. 1986 : ALEX MULLER AND GEORG BEDNORZ (SCIENTIST AT IBM ZURICH LAB) ค้นพบ HTSC ที่ 30 K (BaLaCu 0) ซึ่งถือได้ว่าสูงสุดในยุคนั้น จนทั้ง 2 ได้รับรางวัล NOBEL PRIZE IN PHYSICS

ค.ศ. 1987 : DR. PAUL E.W. CHU (HOUSTON UNIVERSITY) ค้นพบ HTSC ที่ 93 K โดยใช้สาร Y แทน La (YBaCu 0) ถือเป็นแม่แบบของสาร HTSC ที่นิยมประดิษฐ์ในปัจจุบัน

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกค้นพบครั้งแรก โดยนักฟิสิกส์ชาวดัตช์ชื่อ HEIKE KEMERLING ONNES หลังจากที่เขาสามารถเตรียมฮีเลียม ปี พ.ศ. 2451 ด้วยวิธีการลดอุณหภูมิและเพิ่มความดันให้กับก๊าซฮีเลียม ปี พ.ศ. 2454 ONNES ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ เขาพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิ 4.2 K (K แทนเคลวิน เป็นมาตราวัดอุณหภูมิ ซึ่งศูนย์เคลวินเท่ากับ -460 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ -273 องศาเซลเซียส) หรือเรียกว่า เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นี้ว่าอุณหภูมวิกฤต (Critical Temperature : T_c) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า(R) กับอุณหภูมิกวิกฤต (T_c) ของปรอท จากการทดลองของ HEIKE KAMARLINGH ONNES แสดงในรูปที่ 1.1 นอกจากนี้ ONNES ยังพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะอื่นๆทำให้ ONNES ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2454



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของ HEIKE KAMARLINGH ONNES (1911)

หลังจากการทดลองของ ONNES ก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้หันมาทดลองค้นคว้าเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดและค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิม ปี พ.ศ.2406 ได้นำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 K จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) ปี พ.ศ. 2512 ก็สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตเป็น 20 K และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 20 K นับเป็นครั้งแรกที่ใช้ตัวทำความเย็นตัวอื่นที่ไม่ใช่ฮีเลียมเหลว

เวลาผ่านไปอีกกว่า 30 ปี อุณหภูมิวิกฤตถูกทำให้เพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย จากสารประกอบของธาตุไนโอเบียม คือ Nb_3Ge เป็น 23.2 K ในปี พ.ศ. 2516 และในปีนี้เองที่ นาย JOGNSTON ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในกลุ่มของธาตุลิเทียม - โทเทเนียม - ออกซิเจน คือ $LiTi_2O_4$ ที่มีอุณหภูมิวิกฤต 13.7 K ในปี พ.ศ. 2518 SLINGHT ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภท PEROVSKITE คือ $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ ที่ $T = 13$ K ตัวนี้ต่างจากปกติตรงที่ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ควรจะเป็น จากการวิจัยพบว่า $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ จะให้อุณหภูมิวิกฤตสูงสุดที่ค่า X ต่างๆ กัน ทำให้เป็นที่คาดหวังว่าออกไซด์ดังกล่าวจะเป็นหนทางนำไปสู่การค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2526 KARAL ALEX MULLER และ JOHANNES GEORGE BEDNORZ นักวิจัยของ IBM RESEARCH LABORATORY ทำการทดลองโดยใช้ส่วนประกอบจาก อัลลอยด์ของโลหะมาเป็นโลหะออกไซด์ (Metallic Oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหลายชนิดกับออกซิเจนหรือคือวัสดุเซรามิกและในเวลา 3 ปี ก็ได้ค้นพบสารประกอบที่สามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้จากธาตุแบเรียม - แลนทานัม - ทองแดง - ออกซิเจน คือ $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-x)}$ โดยการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อ $X = 1$ และ $X = 0.75$ ได้อุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 35 K

ในปี พ.ศ. 2530 (1987) Pual C.W. Chu และทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแบเรียมเป็นสตรอนเชียม ที่มีขนาดของอะตอมที่เล็กกว่าแบเรียมปรากฏว่าให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นเป็น 54 K จากนั้นกลุ่มวิจัยของ C.W. Chu ก็ได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแลนทานัมเป็นธาตุอิตเทรียม สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 K สร้างความตื่นตัวให้กับวงการฟิสิกส์ทั่วโลก เพราะสามารถที่จะใช้ในไฮโดรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 K ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของ Chu ในไฮโดรเจนเหลวนับว่ามีราคาถูกมากและเตรียมง่ายกว่าตัวทำความเย็นอื่นที่เคยใช้มา

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มของอิตเทรียม - แบเรียม - ทองแดง - ออกซิเจน ที่สูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ซึ่งโครงสร้างแบบนี้คล้ายคลึงกับโครงสร้างทางเซรามิกประเภท K_2NiF_4 ที่เรียกว่า Perovskites แต่เซรามิกแบบนี้ เป็นชนิดที่จำนวนออกซิเจนมีไม่ครบหรือเรียกว่า Oxygen Defect Perovskites อุณหภูมิวิกฤตของธาตุในกลุ่มนี้นับว่าสูง

มาก เมื่อเทียบกับที่เคยสร้างมาจะเห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พบนี้ นั้น เป็นการทดลองที่อาศัยข้อมูลที่มีอยู่แล้ว มิใช่การพบโดยบังเอิญช่องทางที่จะเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตจึงยังมีทางเป็นไปได้ นักวิทยาศาสตร์ยังคงตั้งเป้าหมายที่ตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 K ปัญหาอีกจำนวนมากยังคงต้องถูกแก้ไขใหม่ เช่น สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสจำนวนมากความยากลำบากในการทำให้เป็น เส้น วง และรูปร่างอื่นๆ แต่นักวิจัยส่วนใหญ่เชื่อว่าปัญหานี้จะผ่านพ้นไปได้

1.2 วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากตารางที่ 1.1 แสดงธาตุที่เป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำ พร้อมกันนั้นได้บอกค่าอุณหภูมิวิกฤตด้วย ส่วนที่รู้จักกันอยู่ในทุกวันนี้ ธาตุที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดคือ นิโอเบียม (Niobium; $T_c=9.26$ K) และธาตุที่มีอุณหภูมิต่ำสุดคือ ทังสแตน (Tungsten ; $T_c= 0.012$ K)

ค่าอุณหภูมิวิกฤตไม่ได้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้างผลึกด้วย สารต่างๆก็จะมีรูปแบบผลึกที่หลากหลาย ซึ่งความแตกต่างนี้ก็จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของสารนั้นๆ ตัวอย่างเช่น gray tin จะเป็นสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ white tin เป็นโลหะและในที่นี้จะกลายเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่อุณหภูมิ 3.72 K โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของ lanthanum (α -La และ β -La) ค่าอุณหภูมิวิกฤตก็จะมีค่าต่างกัน (4.9 K สำหรับ α -La และ 6.06 K สำหรับ β -La) ต่อมา นาย Berllium สนใจการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มบาง และพบว่ามีธาตุบางตัวสามารถผลึกผันมาเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความดันสูง (ตัวอย่างเช่น Ba จะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ความดันประมาณ 150 kbar, $T_c \approx 5$ K)

ผลที่ตามมาคือ สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ใช้คุณสมบัติของอะตอมเดี่ยวๆ แต่โดยรวมแล้วจะถูกกำหนดโดยโครงสร้างของสารนั้นๆมากกว่า แต่ก่อนอาจจะคาดหมายได้ว่าตัวนำที่ดีคือ ทองแดง ทอง และเงิน ซึ่งจะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ภายใต้สภาวะปกติ เหมือนกับเป็นครั้งแรกของการเกิดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่ในความเป็นจริงและในทางปฏิบัติบางอย่างได้เปลี่ยนไปอย่างสมบูรณ์แล้ว ทองแดง ทอง และเงินจะไม่ใช้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

ส่วนใหญ่แล้วสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะไม่ใช่ธาตุบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว แต่จะเป็นอัลลอย (Alloys) และสารประกอบ (Compounds) เท่าที่ทราบมาจนถึงทุกวันนี้ มีมากกว่า 6000 ชนิด และตัวเลขนี้ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกวันอย่างไม่รู้จักหยุด สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นอัลลอย (เช่น CuS และ Au_2Bi) และ พอลิเมอร์ (SN_x) ซึ่งจริงๆแล้วโดยส่วนประกอบต่างๆของตัวสารจะไม่มีคุณสมบัตินี้ ซึ่งก็เป็นส่วนสำคัญอีกแบบหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนว่าการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะรวมเป็นปรากฏการณ์แปลกใหม่อีกอย่างหนึ่ง และอุณหภูมิวิกฤตของอัลลอย ก็จะเหมือนกับธาตุบริสุทธิ์ด้วยคือ จะขึ้นกับ

โครงสร้างผลึกของสารนั้นๆด้วย ตัวอย่างเช่น Bi_2Pd จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤต (1.70 K และ 4.25 K) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแลตทิส (Lattice Structure) ถ้าในอัลลอยมีส่วนประกอบที่เป็นธาตุบริสุทธิ์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากกว่าหนึ่ง จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตของอัลลอยเปลี่ยนไปด้วยคือ อุณหภูมิวิกฤตจะมีค่าสูงขึ้นด้วยเสมอ

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าของ T_c และ H_c สำหรับธาตุต่างๆ

Element	T_c (K)	H_c (G) ^b
Al	1.196	99
Cd	0.56	30
Ga	1.091	51
Hf	0.09	-
α -Hg	4.15	411
β -Hg	3.95	339
In	3.40	293
Ir	0.14	19
α -La	4.9	798
β -La	6.06	1096
Mo	0.92	98
Nb	9.26	1980
Os	0.655	65
Pa	1.4	-
Pb	7.19	803
Re	1.698	198
Ru	0.49	66
Sn	3.72	305
Ta	4.48	830

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

Element	T_c (K)	H_c (G) ^b
Tc	7.77	1410
Th	1.368	162
Ti	0.39	100
Tl	2.39	171
α -U	0.68	-
γ -U	1.80	-
V	5.30	1020
W	0.012	1
Zn	0.875	53
Zr	0.65	47

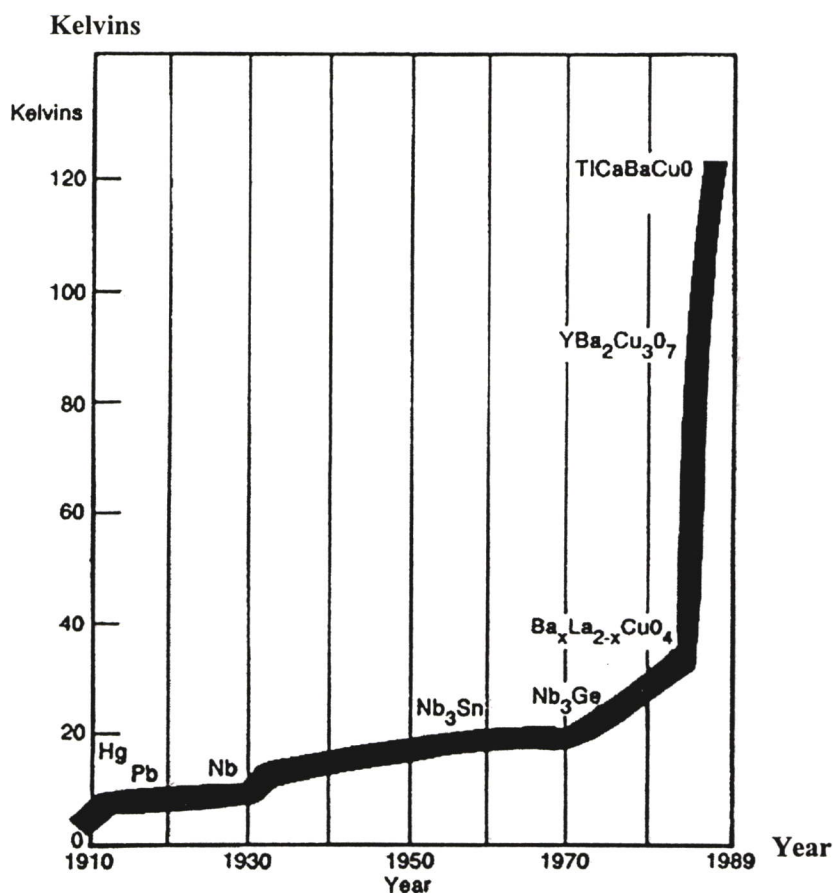
สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงนั้น ในทางปฏิบัติจะอยู่ในรูปอัลลอยและสารประกอบเสมอหลายปีที่ผ่านมา ตามที่ได้มีการจดบันทึกไว้ niobium – tin alloy จะมีอุณหภูมิเท่ากับ 18.1 K ในปี ค.ศ.1973 ได้มีการค้นพบฟิล์มที่สร้างจากสารประกอบ Nb_3Ge ที่แสดงคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิ $T_c = 22.3$ K ในตารางที่ 1.2 จะแสดงถึงค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารประกอบต่างๆ

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารประกอบต่างๆ

Compound	T_c (K)	Compound	T_c (K)
Nb ₃ Sn	18.05	Pb _{0.7} Bi _{0.3}	8.45
Nb ₃ Ge	22.3	V ₃ Si	1.7.1
NbN	16	(SN) _x	0.26
NbO	1.2	(BEDT) ₂ Cu(NCS) ₂	10
BaPb _{0.75} Bi _{0.25} O ₃	11	La _{1.8} Sr _{0.2} CuO ₄	38
Ube ₁₃	0.75	Bi ₂ CaSr ₂ Cu ₂ O _{8+x}	90

รูปที่ 1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ใน 75 ปี ที่ได้มีการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด T_c จะเพิ่มขึ้นประมาณ 18 K [จาก $T_c(\text{Hg}) \approx 4 \text{ K}$ ถึง $T_c(\text{Nb}_3\text{Ge}) \approx 22 \text{ K}$] จะได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของ Niobium ที่จะถูกเลือกนำมาใช้ในงานวิจัย สำหรับวัสดุสารที่อุณหภูมิวิกฤตสูงๆต่อไป

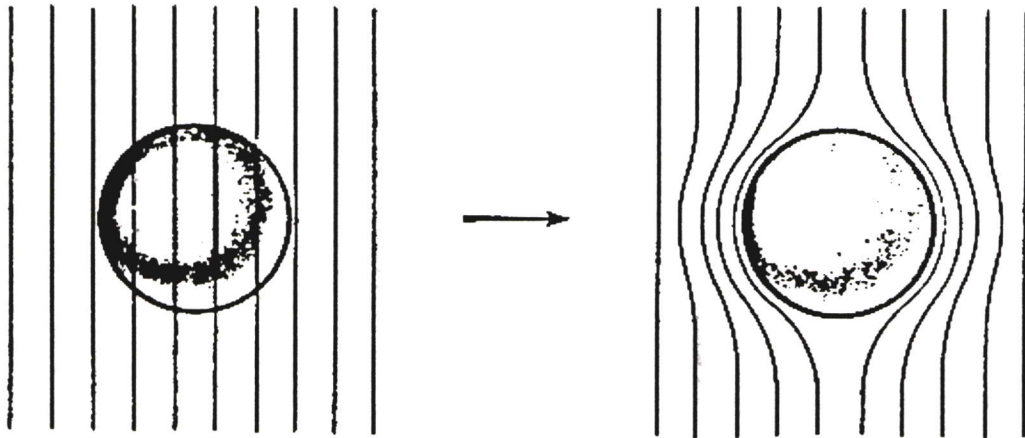
ในปี ค.ศ. 1986 เป็นปีที่ครบ 75 ปี ของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้มีการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใหม่ ในชื่อ คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper Oxides) A.Bednorz และ K.A.Muller (IBM,Zurich) ตัวแรกที่พบจะอยู่ในระบบ La-Ba-Cu-O ซึ่งเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 K และการค้นพบครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยได้เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ต้นปี ค.ศ. 1987 กลุ่มของ C.W. Chu และ M.K. Wu ได้แสดงว่า Y-Ba-Cu-O ซึ่งจะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) และ T_c จะมีค่าไม่เกิน 100 K หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1988 ก็ได้มีการจัดบันทึกใหม่ว่า พบสารประกอบชนิดใหม่ในระบบ Tl-Ca-Ba-Cu-O ที่มี $T_c \approx 120 \text{ K}$ พบโดย Hermann และ Sheng ซึ่งก็เป็นการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใหม่ที่รวดเร็วอีกครั้ง และก็มีทางเป็นไปได้ทีเดียวว่า ในระยะอันใกล้นี้อาจจะพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มี T_c สูงขึ้นไปอีก



รูปที่ 1.2 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่า T_c ที่ช่วงเวลาต่างๆ

1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

ในปี ค.ศ. 1933 Meissner และ Ochsenfeld ได้ค้นพบบางอย่างที่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พวกเขาได้พบว่าสนามแม่เหล็กไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปใน ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ จะเห็นว่าในขณะที่อุณหภูมิสูงกว่า T_c จะมีสภาพเหมือนโลหะธรรมดาทั่วไป ที่อยู่ภายในสนามแม่เหล็กคือ สนามแม่เหล็กทั้งหมดจะเข้าไปภายในสารตัวอย่างได้ แต่ถ้าเราลดอุณหภูมิลง โดยไม่ต้องนำสนามแม่เหล็กออก และจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงขณะนั้นว่า สนามแม่เหล็กจะถูกไล่ออกจากสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ดังรูปที่ 1.3 ที่ ขณะนั้น $B = 0$ (B คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ)



รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

โลหะอื่นที่นอกเหนือจาก Ferromagnetics แม่เหล็กเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากในความเป็นจริง สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างจาก element current ในโลหะซึ่งจะมีทิศทางในการหักล้าง กำหนดให้ H คือ สนามแม่เหล็กภายนอก และ แม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นคือ B โดยที่ $B = \mu H$

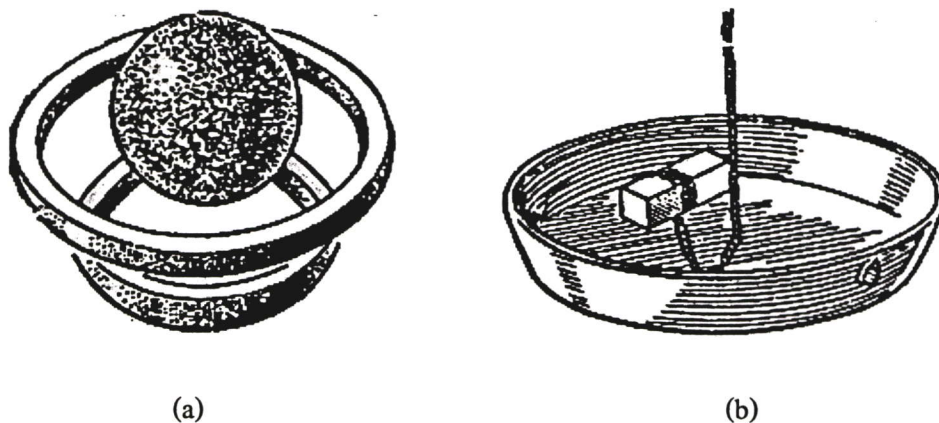
สัมประสิทธิ์ μ จะเรียกว่า Magnetic Permeability เมื่อ $\mu > 1$ (Paramagnetics) ค่าสนามจะเพิ่มขึ้น และจะเป็น diamagnetics ($\mu < 1$) สนามจะมีค่าอ่อนลง หรือ $B < H$ ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $B=0$ อยู่ในลักษณะเดียวกันกับ เมื่อ $\mu=0$ ปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า Ideal diamagnetism

Ideal diamagnetism ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เกิดขึ้นได้อย่างไร ต้องวนกลับไปว่า เมื่อขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้า ซึ่งจะสร้างสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก และผลสรุปว่าสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายในชิ้นสารนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

จากที่ทราบมาแล้วว่า สนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิด surface current ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานใดๆได้เพราะเป็นส่วนที่น้อยมาก แต่ในโลหะธรรมดา สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยสนับสนุนกระแสที่ไหลด้วย เพราะจะไหลในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในที่นี้จะไม่พูดถึง surface current ผลที่ตามมา ideal diamagnetism ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะหมายความว่า surface current ไหลได้โดยปราศจากความต้านทาน ซึ่งความต้านทานนี้จะนำมาซึ่งการสูญเสียในรูปความร้อน และก็จะไม่มีสนามไฟฟ้าที่จะมาลดกระแสลงด้วย

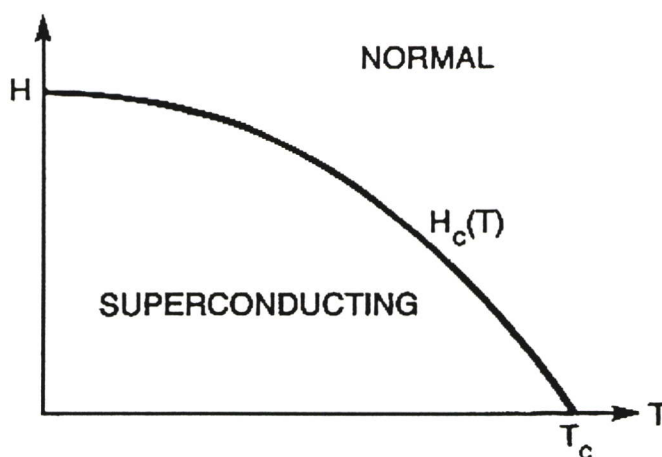
ด้วยเหตุนี้ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการปราศจากความต้านทานอย่างสมบูรณ์ จะเกี่ยวเนื่องอย่างใกล้ชิดกัน ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองจะเป็นจุดเริ่มต้นที่ก่อให้เกิด ทฤษฎีของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากความรู้ที่ผ่านมาจะกล่าวเป็นการทดลองได้ว่า เมื่อนำโลหะรูปวงแหวน ที่ภายในมีกระแสไหลอยู่รอบๆตัวมัน จากนั้นนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปทรงกลม ไปวางเหนือวงแหวนโลหะนั้น ดังรูปที่ 1.4 (a) เมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่า T_c ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมก็จะลอยขึ้นเหนือวงแหวน (Levitation) และในอีกทางเลือกหนึ่ง เราก็สามารถลอยแม่เหล็กถาวรเหนือสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปวงแหวนได้ ดังรูปที่ 1.4 (b)



รูปที่ 1.4 การลอยตัว

จากการทดลองข้างต้นจะกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้เพราะ ที่ผิวหน้าของชิ้นสารจะมี กระแสคงสภาพ (Persistent Current) อยู่ ซึ่งจะเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กที่จะมาต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกเอาไว้ โดย Field Penetration Depth ; δ คือ ความลึกที่สนามแม่เหล็กภายนอก สามารถแทรกซึมจากผิวหน้าเข้าไปในชิ้นสารได้ และนี่ก็เป็นอีกหนึ่งลักษณะสำคัญของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการแทรกซึมของสนามแม่เหล็กภายนอกที่เข้าไปภายในชิ้นสารนี้จะอยู่ในรูปเอ็กโพเนนเชียล เราจะนิยามได้ว่า δ คือระยะทางที่ทำให้สนามแม่เหล็กในชิ้นสารลดลง ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ของ e โดยปกติ Penetration Depth จะอยู่ในหน่วยเล็กๆ ไม่กี่ร้อย อังสตรอม และสนามแม่เหล็กที่ผ่านเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะอยู่ในระดับความลึกไม่กี่ร้อย อังสตรอมเช่นกัน



รูปที่ 1.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามวิกฤตกับอุณหภูมิ

ถ้าเราเริ่มที่จะเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก จนสนามนี้ไปทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และทำให้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดคืนสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา เราจะเรียกค่าสนามตรงนั้นว่า ค่าสนามวิกฤต (Critical Field ; H_c) ค่าสนามวิกฤตนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิวิกฤต ถ้า H_c มีค่าต่ำ ก็จะเป็นการง่ายที่จะทำลายสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รูปที่ 1.5 แสดงค่าสนามวิกฤตที่แปรตามอุณหภูมิ H_c จะมีค่ามากที่สุด เมื่อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในสถานะที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ หรือ $T = 0$ และที่ $T = T_c$ ค่าสนามวิกฤตจะเท่ากับศูนย์ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง H_c กับ T จะอยู่ในรูปของ

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

เมื่อ H_{c0} คือ ค่าสนามวิกฤต ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ และตาราง 1.1 ได้แสดงค่าสนามวิกฤต ; H_{c0} สำหรับธาตุต่างๆด้วย

สรุปได้ว่าสามารถที่จะเปลี่ยนโลหะที่อยู่ในสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้กลับมาอยู่ในสถานะตัวนำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้การลดอุณหภูมิ แต่ใช้การให้สนามแม่เหล็กมากระทำแทน

1.4 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ [2]

การรักษาสถานะสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกกำหนดขึ้นจากค่าสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส รวมทั้งค่าอุณหภูมิ ที่มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical Values) ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ โดยแสดงดังรูปที่ 1.6 และ ตารางที่ 1.3 ที่บอกถึงค่าวิกฤตของอุณหภูมิ และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตของกลุ่มวัสดุที่ใช้ทำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การนำไปใช้ปฏิบัติในความเป็นจริงนั้น โดยทั่วไปต้องการค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงและค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นต้องสัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กสูง ด้วยพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญ อันได้แก่ ค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (T_c) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตด้านบน (H_c) และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต (J_c) ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

1.4.1 ค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature; T_c)

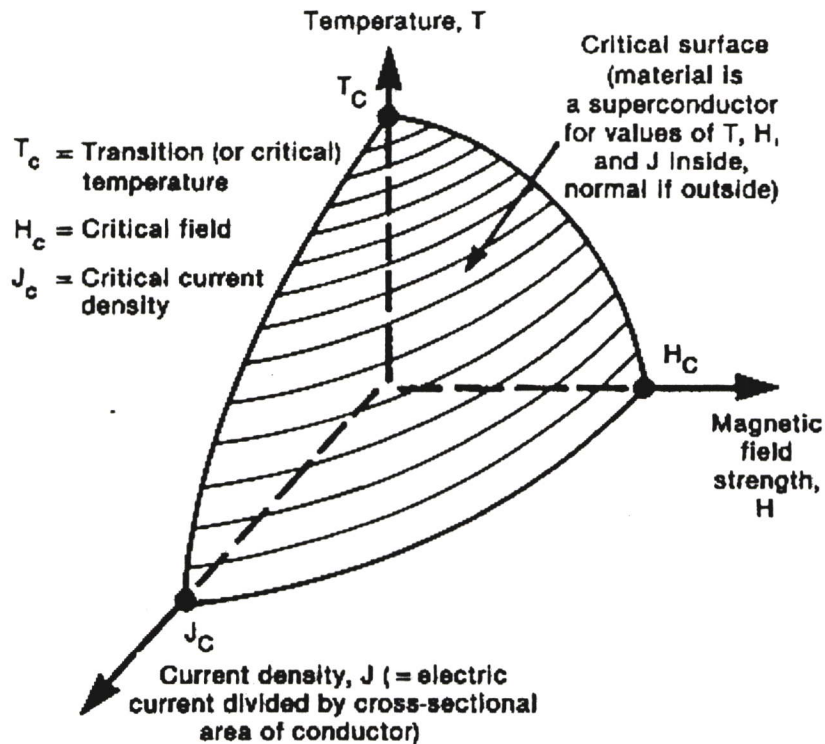
หลักการทั่วไปสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้นั้นคือ วัสดุนั้นๆต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{1}{4} T_c$ นั้นค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะไปถึงครึ่งหนึ่ง โดยประมาณของขีดจำกัดอุณหภูมิที่ต่ำ และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต ซึ่งถึงหนึ่งในสี่โดยประมาณของขีดจำกัด ดังนั้นการทำงานที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) เราต้องการค่า T_c ให้เข้าใกล้ 100 K แต่จะทำให้วัสดุที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95$ K ก็เพียงพอสำหรับการทำงานที่อุณหภูมิห้อง (293 K) เราต้องการวัสดุที่มีค่า T_c มากกว่า 400 K ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่แสดงไว้สูงสุดที่ได้กล่าวมาแล้ว วัสดุที่มีค่า T_c สูงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติโดยรวมดีขึ้น สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ โดยคุณสมบัติอื่น ๆ ก็สามารถยอมรับได้ และวัสดุที่มี T_c สูงกว่า 400 K นี้จะมีผลต่อการปฏิรูปทางเทคโนโลยีอย่างแท้จริง ในกลุ่มอุณหภูมินี้สามารถนำไปพิจารณาการนำไปประยุกต์ใช้งานทางตลาดได้อีกมากมาย

1.4.2 ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical magnetic Field; H_c)

สารตัวอย่าง $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตด้านบนสูงสุดสำหรับโครงสร้างผลึกเดี่ยว (Single Crystals) หรือ ค่า H_{c2} จะขึ้นกับทิศทาง นั่นคือขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กสัมพันธ์แกน a-, b- หรือ c- ของโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic ที่ 4.2 K จะมีค่าในช่วงตั้งแต่ 30T (แกน c) ถึง 150T (แกน a หรือ b)

จากกราฟในรูปที่ 1.6 สามารถใช้อธิบายผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยพิจารณาความหนาแน่นกระแสไบอัสน้อยกว่าค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเป็น H_1 ค่า J_c จะมีค่าลดลงเป็น J_{c1} และเมื่อให้สนามแม่เหล็ก H_2 ค่า J_c จะเป็น J_{c2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง นั่น

คือสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายไปมากขึ้น เป็นผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นกับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

1.4.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density; J_c)

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ ค่า J_c มีค่าเกิน $10^5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ เป็นที่ต้องการทั้งตัวนำชนิดบัลค์ (Bulk) สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางพาณิชย์ และในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดฟิล์มบางสำหรับงานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ตัวนำชนิดบัลค์เซรามิกของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ สามารถทำให้ได้ถึง $10^4 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ที่ 4.2 K และ 6 T อย่างไรก็ตามค่า J_c จะตกถึงระดับในช่วง $10^2 - 10^3 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ที่ 77 K และ 6 T ค่า J_c เหล่านี้กำหนดขึ้นจากการวัดแบบแมกนีโตเซชัน (Magnetization Measurement) ค่า J_c ที่หาได้จากการวัดแบบทรานสปอร์ต (Transport Measurement) ตามปกติจะมีค่าต่ำกว่า ไม่มีความเข้าใจที่ชัดเจนของค่า J_c ที่ลดลงเหล่านี้ในปัจจุบัน แต่การได้ค่า J_c ที่ยอมรับได้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดบัลค์มีความสำคัญอย่างมากและควรจะเป็นเป้าหมายหลักของการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการสร้าง

โดยอาศัยประสบการณ์ในปัจจุบัน รายละเอียดเป้าหมายที่ยอมรับได้สำหรับตัวนำแม่เหล็กในเชิงการค้า จะเป็น J_c มีค่าประมาณ 10^5 A-cm^{-2} ที่ 77 K และ 5 T โดยวัดที่สภาพด้านทานนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่า $10^{-14} \Omega\text{-mm}$ พร้อมกับมีค่า strain tolerance ที่ 0.5 % และสามารถหาได้ในราคาที่ประมาณเท่ากัน หรือต่ำกว่าราคาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำที่ใช้กันทั่วไป

การวัดเบื้องต้นของฟิล์มบางผลึกเดี่ยว ที่ปลูกขึ้นด้วยวิธีการอีพิแทกซ์ชี้ว่าค่า J_c เกินกว่า 10^6 A-cm^{-2} ที่ 77 K และสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ค่าเหล่านี้ดูเหมือนพอเพียงสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1.3 แสดงค่าวิกฤตสำหรับวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

	Temperature (Kelvin)	Magnetic Field (gauss)	Current Density ^a (amp per square centimeter)
Aluminum	1.2	105	
Mercury	4.2	410	
Lead	7.2	800	
Niobium(75%)			
Titanium(25%)	10	14×10^{4b}	$\sim 10^{5c}$
Niobium-tin	18	23×10^{4b}	$\sim 10^{7c}$
1-2-3 ceramic			
(YBa ₂ Cu ₃ O _{6.9})	93	100×10^{4b}	10^3 to $>10^6d$

(a) At zero magnetic field.

(b) At upper critical field (Type II superconductor)

(c) At 4.2 K

(d) At 77 K The Highest value are reached with oriented single – crystal film.

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Junction)

ในปี ค.ศ.1960 Ivar Giaever ได้ค้นพบการทะลุผ่านของ Quasi Particle จากแผ่นฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็น โลหะ-ฉนวน-ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (MIS) และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด-ฉนวน-ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (SIS) ในการค้นพบการทะลุผ่านนี้ ทำให้สามารถใช้วัดค่าช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) ความหนาแน่นของพลังงาน (Density of State) และ Phonon Spectra ได้ ในปี ค.ศ.1962 B.D. Josephson นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ค้นพบปรากฏการณ์โจเซฟสัน และได้เสนอ Quantum Tunnelling Effect ที่เกิดขึ้นเมื่อกระแส Cooper Pair ทะลุผ่านชั้นบางๆ ($\sim 10 \text{ \AA}$) ของฉนวนที่อยู่ระหว่างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Junction) และในปี ค.ศ. 1973 เขาก็ได้รับรางวัลโนเบล ปรากฏการณ์โจเซฟสันเป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจอย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในการเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันจะเกิดกระแสตรงซูเปอร์โหลจำนวนหนึ่ง ซึ่งกระแสตรงซูเปอร์โหลนี้จะไหลผ่านผนังกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวีคลิงก์(Weak Link) ซึ่งคุณสมบัติของวีคลิงก์นี้ เป็นคุณสมบัติที่พิเศษอย่างมากในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยกระแสตรงซูเปอร์โหลนี้จะเคลื่อนที่เร็วมากและมีพลังงานจลน์มาก โดยคุณสมบัติของรอยต่อโจเซฟสัน ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของวีคลิงก์นั้นๆ โดยตรงส่วนนี้ จะได้กล่าวต่อไป ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น กระแสที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โจเซฟสันและวีคลิงก์ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นสำคัญที่สุด และมีความเป็นไปได้ในการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และความเร็วในการสวิตซ์สูง ซึ่งทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีหน่วยความจำ

2.1.1 ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect) [7]

ในการศึกษาเรื่องการทะลุผ่านระหว่างโลหะ-โลหะนั้นจะต้องมีฉนวนหรือผนังกันบางๆ ซึ่งต้องมีความบางน้อยกว่า 10^{-7} เมตร อิเล็กตรอนนำธรรมดาจึงสามารถทะลุผ่านข้ามฉนวนไปได้ เพราะโดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านฉนวนนี้ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยกว่าที่จะข้ามกำแพงศักย์ไปได้ แต่ถ้าฉนวนนั้นบางมาก ๆ อิเล็กตรอนก็สามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปได้ ปรากฏการณ์ทะลุผ่านนี้เป็นปรากฏการณ์เชิงกลทางควอนตัม (Quantum Mechanical Phenomenon) จากการศึกษาการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนเดี่ยว ๆ นี้เป็นการศึกษาการทะลุผ่านแผ่นฟิล์มสองแผ่นซึ่งมีผนังกันออกไซด์กันอยู่ ซึ่งผนังกันนี้มีอยู่หลายชนิดที่ใช้ในการศึกษา ส่วนมากแล้วในการทะลุผ่านในแต่ละด้านของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีการซ้อนทับ (overlap) กัน แต่

ในความเป็นจริง ๆ แล้วผนังกันออกไซด์จะต้องเกิดการซ้อนทับกันขึ้นอยู่แล้ว ผลจากการเกิดซ้อนทับนี้จะเกิดปรากฏการณ์ใหม่ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์โจเซฟสัน (Josephson Effect) ทำให้เกิดมีกระแสตรงซูเปอร์ไหลผ่านแผ่นผนังกันและผนังกันนี้มีพฤติกรรมเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงค์ ดังรูปที่ 2.2 (a) ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเกิดมีแรงดันตกคร่อมแล้วจะมี Phase Slip เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองด้านและ Phase Slip สามารถชิงโครนส์กับสนามไฟฟ้าแบบสลับที่กระทำกับรอยต่อแบบวิคลิงค์นี้

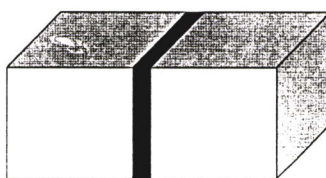
2.1.2 ชนิดของรอยต่อโจเซฟสัน (Type of Josephson Junction) [6]

ผนังกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคลิงค์นี้ไม่ได้มีเฉพาะแต่ผนังกันที่สร้างจากออกไซด์เท่านั้น โดยหลักของปรากฏการณ์โจเซฟสันแล้วสามารถเกิดปรากฏการณ์ได้จากการที่มีการเชื่อมต่อ (Coupling) อย่างแข็งแรงเพียงพอสำหรับเฟสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในแต่ละด้านและอีกกรณีเกิดจากการเชื่อมต่อซึ่งอาจจะมีลักษณะหลวม ๆ เพียงพอสำหรับสนามคลื่นไฟฟ้ากระทำได้ในลักษณะวิคลิงค์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้สามารถแบ่งได้ตามชนิดต่าง ๆ ดังนี้ คือ

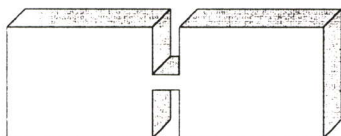
1. รอยต่อโจเซฟสันแบบทะลุผ่าน(Tunnelling Junction) หรือ SNS Weak Link ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิก
2. แผ่นฟิล์มหรือบัลค์(Bulk) ที่มีลักษณะรูปแบบเป็น Constriction หรือ บริดจ์(Bridge)
3. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะบัลค์ 2 ชั้นที่มีการเชื่อมกันแบบ Point Contact ลักษณะของผิวจะเกิดการออกซิไดส์และลักษณะของ Point เกิดจากอัดของชั้นบัลค์ ส่วนมากแล้ว Point Contact จะต้องสร้างใน Cryostat ที่สามารถกำหนดความดันได้

โดยปรากฏการณ์โจเซฟสัน ของรอยต่อชนิดบริดจ์ และ point contact จะเป็นไปตาม รูปที่

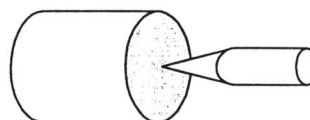
2.2 (b)



(a) รอยต่อโจเซฟสันแบบทะลุผ่าน



(b) รอยต่อแบบบริดจ์



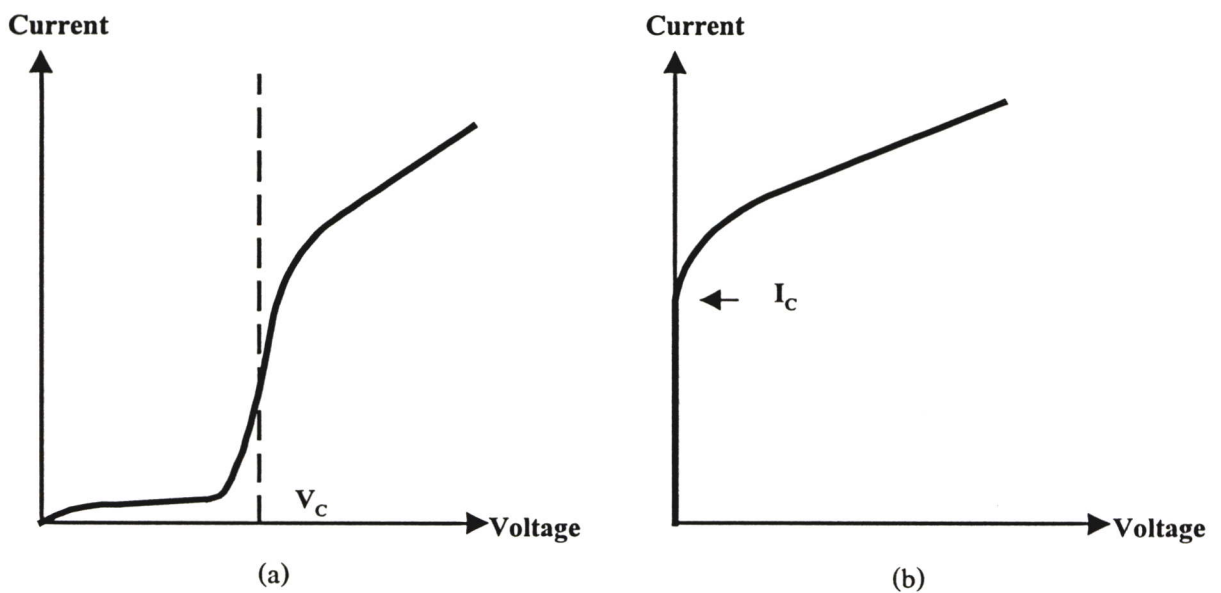
(c) รอยต่อแบบ Point Contact

รูปที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวิคลิงค์ (Weak-Linked Superconductor) [6]

ในวัสดุเชิงรูปแบบต่าง ๆ เหล่านี้จะมีพฤติกรรมแตกต่างกันในรายละเอียด แต่ทุกรูปแบบก็สามารถเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันได้ ในพฤติกรรมที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการเชื่อมต่อ โดยรอยต่อมีลักษณะแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากวัสดุเชิงรูปแบบออกไซด์ รูปแบบที่เกิดจากขอบเขตของเกรน (Intergrain) บริดจ์ (Bridge) และ Point Contact ตามลำดับ รวมทั้งมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในรูปแบบวัสดุเชิงรูปแบบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต่าง ๆ เหล่านี้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับทางวงจรไฟฟ้ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

โดยหลักการของการเกิดปรากฏการณ์โจเซฟสันในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะเกิดซ้อนทับของฟังก์ชันคลื่นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองด้าน โดยมีคู่อิเล็กตรอนเป็นพาหะนำกระแส ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางควอนตัม เราจึงใช้ฟังก์ชันคลื่นทางควอนตัมระดับมหภาค (Macroscopic Quantum State) อธิบายถึงสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ฟังก์ชันคลื่นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสองตัวระหว่างส่วนที่เป็นผนังกันระหว่างกันจะเกิดการซ้อนทับและมีกระแสตรงซูเปอร์ไหลผ่านผนังกันนั้นได้ ดังนั้นในการศึกษาถึงปรากฏการณ์โจเซฟสันสามารถทำให้เข้าใจถึงสภาพการเปลี่ยนแปลง (Transition) ของตัวนำไฟฟ้าหรือการจัดเรียงตัวของสปินในสารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnet) ที่จุดคูรีได้เป็นอย่างดี [8]

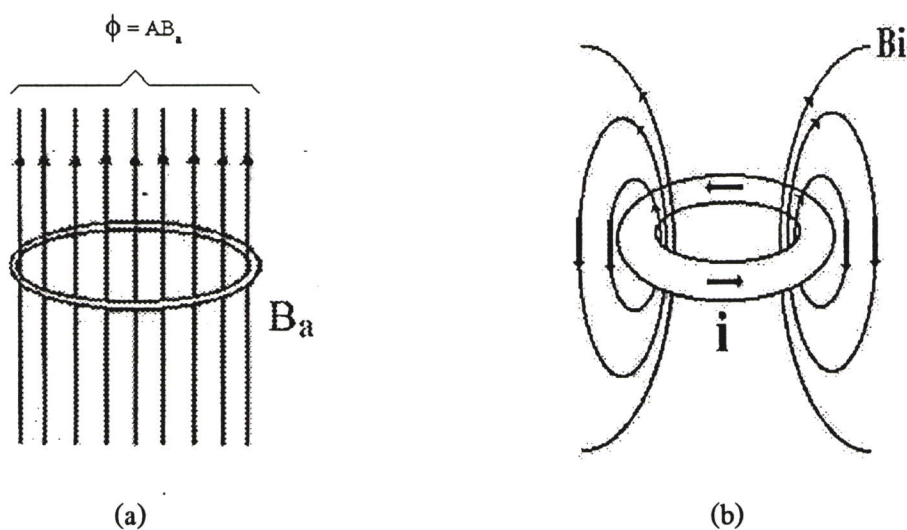
เนื่องจากในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นส่วนมากมีพื้นฐานมาจากรอยต่อโจเซฟสัน และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดลักษณะวัสดุเชิงรูปแบบก็เป็นรอยต่อโจเซฟสันชนิดหนึ่งซึ่งสามารถนำมาสร้างได้สะดวกและง่าย ดังนั้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะวัสดุเชิงรูปแบบจึงเป็นที่สนใจต่อการศึกษานำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ของหน่วยความจำและอุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์อื่น ๆ อีกมากมาย



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์โจเซฟสัน

2.2 กระแสคงสภาพ (Persistent Current)

คุณสมบัติทางแม่เหล็กในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กอ่อนนั้นจะประพฤติตัวเหมือนกับสารแม่เหล็ก Diamagnetic กล่าวคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎของ Lenz's law [4,5] ซึ่งสนามแม่เหล็กนั้นจะไม่ไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ทำให้สนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์ โดยจะผลักความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันที ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)



A: พื้นที่หน้าตัด B_a : ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก

รูปที่ 2.3 (a) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก ตัดผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
(b) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้าน และกระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นมีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำจะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพ (Persistent Current) ไหลวนอยู่ที่ผิวของชิ้นสาร กระแส (I) ซึ่งไหลต่อเนื่องกันที่ผิวที่เป็นวงปิด จากการพิจารณา ถึงโครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวงแหวน ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ เมื่อมีฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก $\Phi = AB_a$ ตามรูปที่ 2.3 (a) จะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพไหลวนอยู่รอบวงแหวนในทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์แม่เหล็ก (B_a) ในวงแหวนเพิ่มขึ้น ที่ทำให้มีการหักล้างฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอก (B_{ext}) ขณะที่สนามเปลี่ยนแปลงจะได้ว่า [6]

$$EMF = -A \frac{dB_a}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ R และ L เป็นความต้านทานรวม และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรในสภาพความต้านทานปกติกจะมีการนำกระแสอย่างรวดเร็ว และจะค่อย ๆ ลดลงไปถึงฟลักซ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในวงแหวนจะเปลี่ยนเป็นค่าใหม่ซึ่งในสภาพของวงจร ที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น สภาพความต้านทานจะเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$-A \frac{dB_a}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

$$Li + AB_a = \text{const.} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 นี้พบว่า เป็นผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าเส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีการเหนี่ยวนำกระแสให้หมุนเป็นวงกลม ทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก (B_i) ภายในชิ้นสารนั้นมีความเท่าเทียมกันในทุกที่ และมีทิศทางตรงกันข้ามกับกับ เส้นแรงแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะกระจายออกไปอยู่ที่ผิวภายนอกของเนื้อสารตามรูป 2.3 (b) ซึ่งเป็นกรณำไปสู่การป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กภายนอกไม่ให้เข้าไปในเนื้อสาร ผลดังกล่าวนี้เป็นผลของ Perfect Diamagnetic ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.3 ปรากฏการณ์กระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Persistent Current Effect)

เมื่อพิจารณาโลหะรูปวงแหวนถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ที่มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้า ไหลในวงแหวนนั้น โดยเป็นไปตามกฎของเลนซ์ (Len's law) ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเขียนสมการ (2.2) ใหม่ได้ดังนี้

$$RI + L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

ถ้าให้ (I_0) แทนค่ากระแสเริ่มต้นจะได้ว่า

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad (2.5)$$

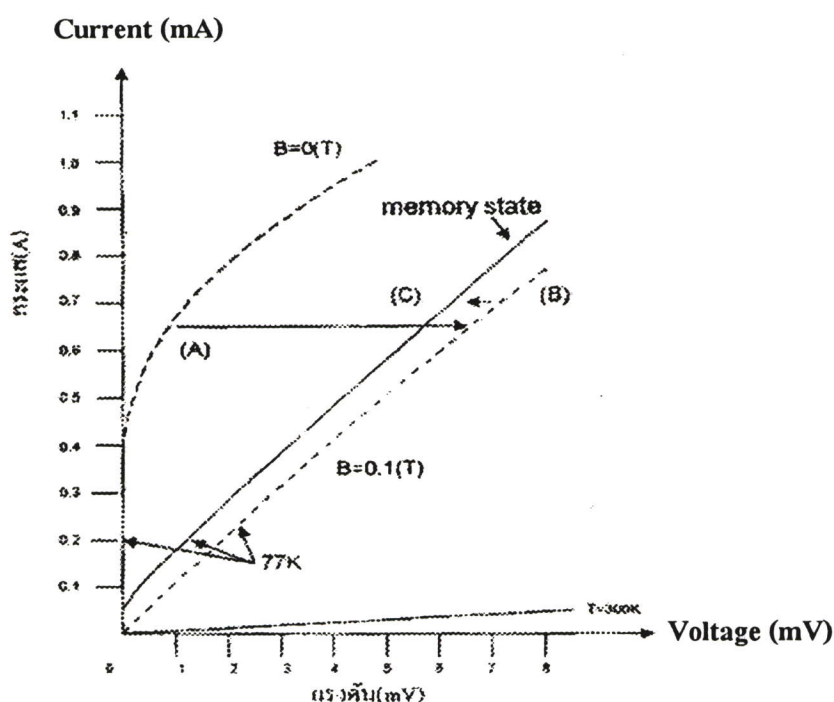
จากสมการ (2.5) นี้ จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนในวงแหวนจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่ถ้าวงแหวนนั้นเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่มีค่าความต้านทานเป็นศูนย์แสดงให้เห็นว่า

$$I = I_0 \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนจะคงที่ตลอดเวลา เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current)

2.4 การจำสภาพแม่เหล็ก [9,10]

โครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นมีคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ที่ค่าสนามแม่เหล็กสูงๆ จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น เกิดสภาพแม่เหล็กปริมาณน้อยๆ ที่ตกค้างอยู่ในตัวมันด้วย โดยทราบได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่มากระทำนั้นมีค่ามากขึ้นแต่ค่าแรงดันนั้นจะยังคงปรากฏอยู่ ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.4



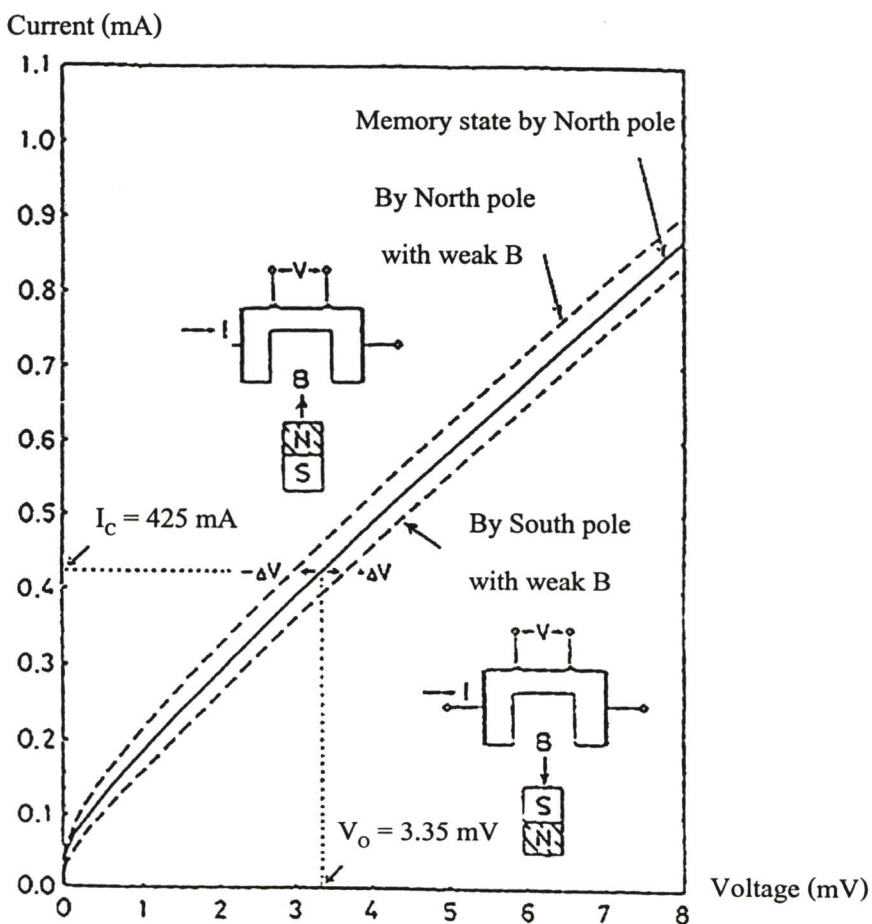
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้า [9,10]

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวต้านทานไฟฟ้าทั่วไป และในอุณหภูมิ 77 K สามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 500 mA แต่เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก 0.1 T จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป พบว่าคุณสมบัติของตัวนำ

ไฟฟ้ายังยวดยังจะไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ โดยจะยังคงมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารอยู่ ถึงแม้กระแสที่ไหลผ่านเพียง 100 mA ก็ตาม จากกราฟจะพบว่า ค่ากระแสวิกฤตขณะนี้นั้นจะเปลี่ยนแปลงเป็นประมาณ 50 mA นั่นคือกระแสวิกฤตที่ลดลงจะทำให้เกิดสภาพต้านทานสูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาที่กระแสคงที่พบว่า แรงดันตกคร่อมจะมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ชิ้นสารอยู่ในสภาวะจำแรงดันที่ตกค้างอยู่นี้ จะกล่าวได้ว่า เกิดการจำสภาพแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายังยวด

2.5 วงจรวัดสนามแม่เหล็กแบบวงจรวีทสโตนบริดจ์ [9]

ในหัวข้อ 2.4 ได้กล่าวถึงปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายังยวดแล้ว ก็จะนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยสร้างเป็นวงจรวัดสนามแม่เหล็กแบบวีทสโตนบริดจ์ ชนิดตัวนำไฟฟ้ายังยวด เพื่อนำไปใช้ตรวจจับทั้งขนาดและขั้วของสนามแม่เหล็ก โดยการทำให้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายังยวดทั้งสองส่วน เกิดการแยกจำสนามแม่เหล็ก ขั้วเหนือและขั้วใต้พร้อมกัน ซึ่งสามารถแสดงได้โดยทางคณิตศาสตร์ ของวงจรวีทสโตนบริดจ์



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดตัวนำไฟฟ้ายังยวดในสภาวะที่มีการจำสนามแม่เหล็กภายนอกขั้วเหนือ [9]

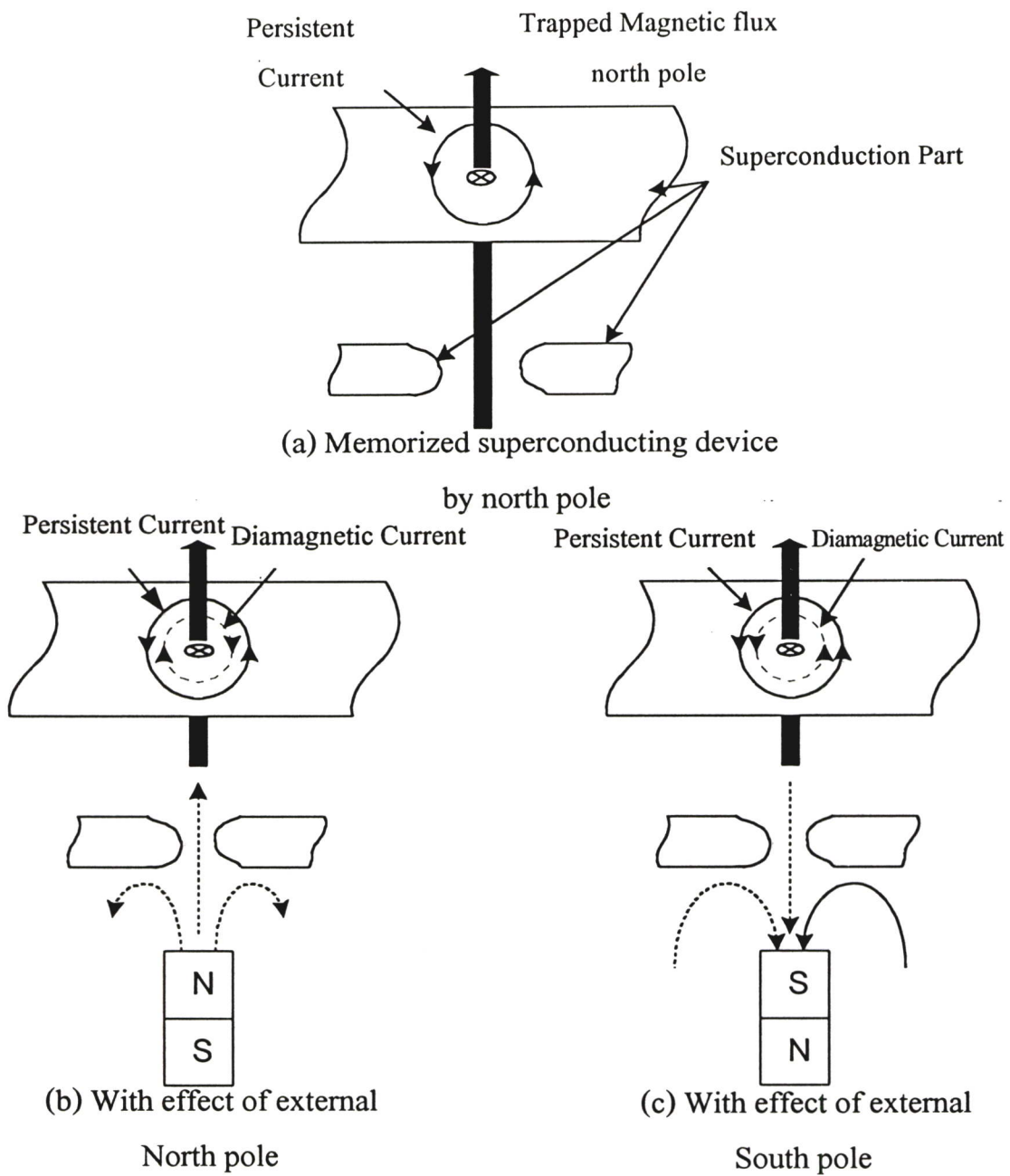
จากรูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาด ที่มีการจำขั้วเหนือ โดยที่

- ΔV เป็นค่าแรงดันเมื่อเทียบกับค่าแรงดันที่มีการจำก่อนหน้า
- $-\Delta V$ เป็นค่าแรงดันที่ลดลง เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำมีขั้วเดียวกับชิ้นสารมีการจำ
- $+\Delta V$ เป็นค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำมีขั้วต่างชนิดกับชิ้นสารที่มีการจำ

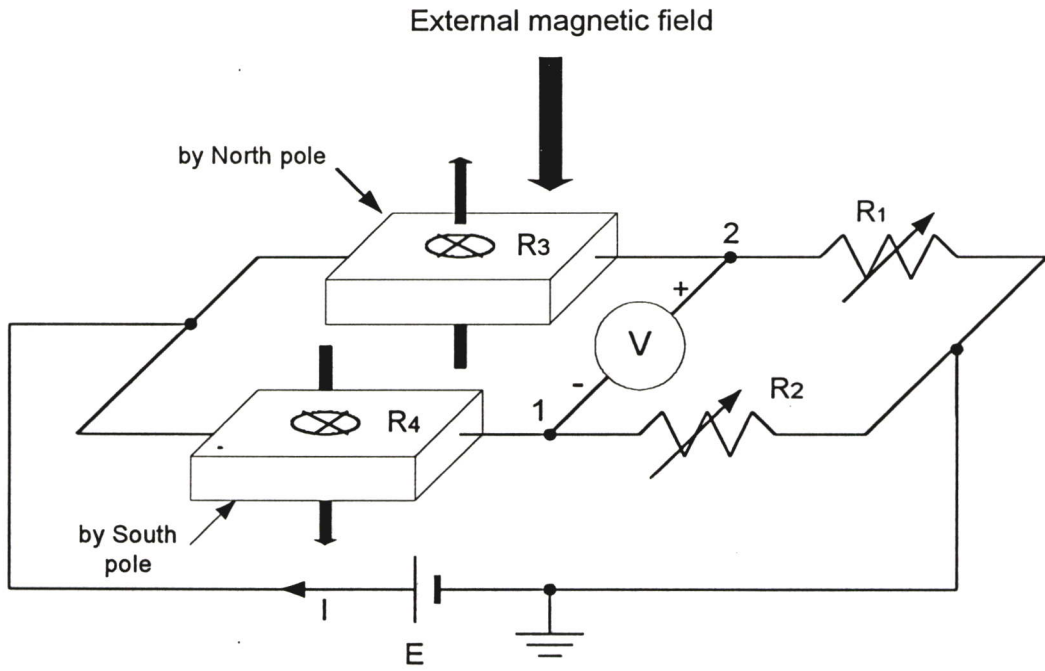
ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยแบบจำลองโครงสร้างตามรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาด ที่จำสภาพสนามแม่เหล็กที่เป็นขั้วเหนือ จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอ่อนภายนอกที่มากกระทำจากขั้วได้(ขั้วตรงกันข้าม) โดยทำให้สภาพต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงดันตกคร่อมชิ้นสารก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนภายนอกที่มากกระทำจากขั้วเหนือ(ขั้วเดียวกัน) จะทำให้สภาพต้านทานลดลง แรงดันตกคร่อมชิ้นสารก็จะลดลงด้วย

รูปที่ 2.6 (a) แสดงแบบจำลองของชิ้นสารตัวอย่างที่ถูกให้ขั้วเหนือไว้ (เนื่องจากเส้นแรงที่ถูกแทรกไว้) ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกแบบจำลองนี้จะเป็นการรวมถึงคำนิยามของทิศทางกระแสสภาพ และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกจำไว้ สำหรับทิศทางของกระแสสภาพในกรณีนี้คือ ทิศทางแนวหน้าพิกา ดังนั้นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกจำไว้โดยขั้วเหนือ นั้นจะแสดงโดยลูกศรที่มีทิศทางพุ่งขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแทรกนี้จะไปทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยังขาดบางส่วน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปรากฏแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร(V_{MEM}) ที่แต่ละค่าของกระแส I รูปที่ 2.6 (b) แสดงถึงแบบจำลองของชิ้นสารที่มีการจำสภาพแม่เหล็กโดยขั้วเหนือ กับผลของเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้คือขั้วเหนือ(ขั้วเดียวกัน) เนื่องจากสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดเป็นสารแม่เหล็กไดอาซึ่งจะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วน ที่มีทิศทางตรงข้ามกับ เส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้ เป็นผลให้เกิดกระแสแม่เหล็กไดอาเหนี่ยวนำที่พื้นผิวโดยมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาซึ่งแสดงด้วยวงกลมประ เนื่องจากกระแสทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดซึ่งผ่านทะลุตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดจึงมีขนาดเล็กลง เป็นเหตุให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารลดลง ที่ค่ากระแสเดียวกัน(I)

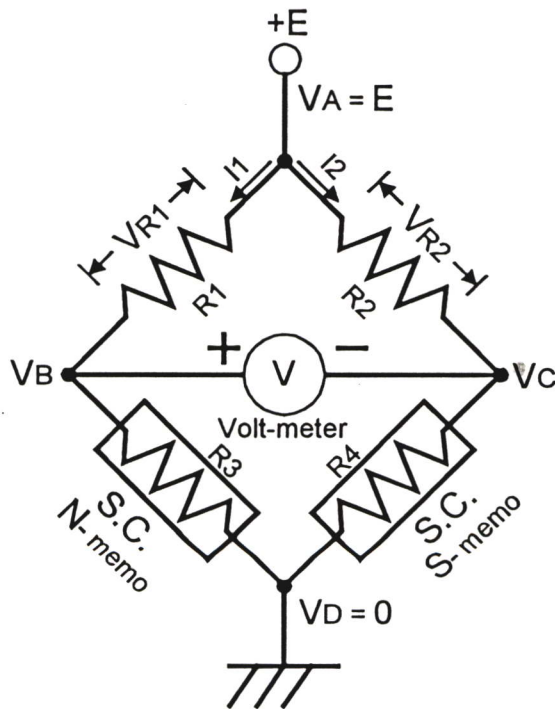
ในรูปที่ 2.6 (c) เส้นแรงแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้มาจากขั้วได้(ขั้วตรงข้าม) ด้วยเหตุผลเดียวกับในข้างต้น ทิศทางของกระแสแม่เหล็กไดอาที่พื้นผิวเหนี่ยวนำจะมีทิศทางเข็มนาฬิกาและแสดงโดยวงกลมประ ในกรณีนี้กระแสทั้งสองชนิดมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดซึ่งผ่านทะลุตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้บริเวณส่วนนำไฟฟ้าที่ยังขาดที่ถูกทำลายมีมากขึ้น ดังนั้นแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในกรณีนี้จึงมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ณ ค่ากระแสเดียวกัน (I)



รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองสำหรับการอธิบายหลักการของหัววัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.7 วงจรวิทสโตนบริดจ์ที่ประยุกต์ใช้กับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสภาวะที่มีความจำ



รูปที่ 2.8 วงจรวิทสโตนบริดจ์ที่ประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

จากหลักการที่กล่าวมานั้น จะเป็นการไม่สะดวกที่จะนำอุปกรณ์ตรวจจับเส้นแรงแม่เหล็กนี้ไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจาก การที่จะต้องบันทึกค่าแรงดัน ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กเริ่มแรกอย่างแม่นยำ เพื่อเป็นค่าอ้างอิง ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็น เหตุให้เกิดแนวคิดที่จะปรับปรุงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้ ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่มีการจำสภาพแม่เหล็กต่างขั้วกัน 2 ชั้น มาประกอบเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์

จากผลข้างต้นนี้เอง สามารถแสดงได้โดยทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

ในวงจรวีทสโตนบริดจ์ นี้จะมีค่าจำกัดความอยู่ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

1) เมื่ วงจรวีทสโตนบริดจ์สมดุลเงื่อนไขสมดุลถูกกำหนดโดย

$$V = 0 \quad \text{หรือ} \quad V_{R1} = V_{R2}$$

ซึ่ง V_{R1} และ V_{R2} เป็นแรงดันตกคร่อม R_1 และ R_2 ตามลำดับ

2) ด้วยผลของเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกขั้วใต้ ค่าความต้านทาน R_3 ของอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่จำขั้วเหนือ R_3^+ จะถูกเปลี่ยนเป็น R_3^+ ซึ่ง $R_3^+ > R_3$

$$\text{นั่นคือ } R_3 \rightarrow R_3^+ \text{ ซึ่ง } R_3^+ > R_3$$

ค่าความต้านทาน R_4 ของอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่จำขั้วใต้ จะถูกเปลี่ยนเป็น R_4^- ซึ่ง

$$\text{นั่นคือ } R_4 \rightarrow R_4^- \text{ ซึ่ง } R_4^- < R_4$$

3) ด้วยผลของเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกขั้วเหนือ ค่าความต้านทาน R_3 จะถูกเปลี่ยนเป็น R_3^- ซึ่ง $R_3^- < R_3$ มีค่าความต้านทานน้อยกว่า R_3

$$\text{นั่นคือ } R_3 \rightarrow R_3^- \text{ ซึ่ง } R_3^- < R_3$$

และค่าความต้านทาน R_4 จะถูกเปลี่ยนเป็น R_4^+ ซึ่งมีความต้านทานมากกว่า R_4

นั่นคือ $R_4 \rightarrow R_4^+$ ซึ่ง $R_4^+ \setminus R_4$

จากคำจำกัดความข้อที่ 1

$$V_{R_1} = V_{R_2}$$

$$\text{ดังนั้น } I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2 \quad (2.7)$$

จากวงจรวิเศษโตนบรีดจ์จะเห็นได้ว่า

$$I_1 = \frac{E}{(R_1 + R_3)} \quad (2.8)$$

และ

$$I_2 = \frac{E}{(R_2 + R_4)} \quad (2.9)$$

2.5.1 กรณีเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกขั้วได้กระทำกับตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยที่มีการจำขั้วเหนือ
เจือปนในข้อที่ 2 จะถูกนำมาใช้ ดังต่อไปนี้

$$R_3 \langle R_3^+, R_4 \rangle R_4^-$$

ดังนั้น ค่า I_1 และ I_2 จะถูกเปลี่ยนไปเป็น

$$I_1 \rightarrow I_{1s}, I_2 \rightarrow I_{2s}$$

จากค่ากระแสทั้งสองนี้ สามารถที่จะพบได้จากวงจรวิเศษโตนบรีดจ์ว่า

$$I_{1s} = \frac{E}{(R_1 + R_3^+)} \quad (2.10)$$

และ

$$I_{2s} = \frac{E}{(R_2 + R_4^-)} \quad (2.11)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.10) กับสมการที่ (2.8) และสมการที่ (2.11) กับสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่า

$$I_{1S} < I_1$$

และ

$$I_{2S} > I_2$$

แทนค่า I_{1S} และ I_{2S} ลงในสมการ (2.7) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.7) $I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2$

ดังนั้น $I_{1S} \times R_1 = I_{2S} \times R_2$

หรือ $V_{R1} < V_{R2}$

นั่นคือ $(V_A - V_B) < (V_A - V_C)$

หรือ

$$V_B > V_C \quad (*)$$

ค่าจำกัดความของ $V_B > V_C$ มีความหมายว่า V_B แรงดันสูงกว่า V_C ดังนั้น ค่าแรงดันที่ถูกแสดงโดยโวลต์มิเตอร์ จะมีค่าเป็นบวก

2.5.2 กรณีเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกจากขั้วเหนือกระทำกับตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดที่มีการจำขั้วเหนือ

ซึ่งมีค่าจำกัดความตามข้อที่ 3 จะถูกนำมาแสดงได้ดังนี้

$$R_3 > R_3^-, R_4 < R_4^+$$

ดังนั้น

$$I_1 \rightarrow I_{1N}, I_2 \rightarrow I_{2N}$$

ซึ่ง

$$I_{1N} = \frac{E}{(R_1 + R_3^-)} \quad (2.12)$$

และ

$$I_{2N} = \frac{E}{(R_2 + R_4^+)} \quad (2.13)$$

ด้วยการเปรียบเทียบสมการที่ (2.12) กับสมการที่ (2.8) และสมการที่ (2.13) กับสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่า

$$I_{1N} > I_1$$

และ

$$I_{2N} < I_2$$

แทนค่า I_{1N} และ I_{2N} ลงในสมการ (1) ก็จะสามารถเขียนได้ ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (1)

$$I_1 \times R_1 = I_2 \times R_2$$

ดังนั้น

$$I_{1N} \times R_1 = I_{2N} \times R_2$$

หรือ

$$V_{R1} > V_{R2}$$

นั่นคือ

$$(V_A - V_B) > (V_A - V_C)$$

$$V_B < V_C$$

(*)

ค่าจำกัดความของ $V_B < V_C$ มีความหมายว่า V_B แรงดันต่ำกว่า V_C ดังนั้น ค่าแรงดันที่ถูกแสดงโดยโวลท์มิเตอร์ จะมีค่าเป็นลบ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อ 2.5 นี้ แสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กได้ โดยการใช้พื้นฐานของแบบจำลองปรากฏการณ์การจำสภาพแม่เหล็กและการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าแรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีสภาพแม่เหล็กภายนอกที่ต้องการวัดขีดใด ๆ มากกระทำกับชิ้นสารที่มีการจำ จะถูกยืนยันด้วยผลการทดลองในรูปของคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่ได้กล่าวมาแล้ว

การนำเอาหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งานนั้น สามารถหลีกเลี่ยงความยุ่งยากในการวัดขนาด และขั้วของสนามแม่เหล็กนี้ โดยการใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์ ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก ที่ทำให้วงจรวีทสโตนบริดจ์เสถียรเกิดความแตกต่างกันตามขนาด และขั้วของสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถอธิบายให้เข้าถึงพื้นฐานของหัววัดสนามแม่เหล็กด้วยวงจรวีทสโตนบริดจ์นี้ ดังที่ได้แสดงให้เห็นด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ข้างต้น

บทที่ 3

การศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

จากการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ผ่านมามีการศึกษาและประยุกต์ใช้งานต่างๆมากมาย ส่วนใหญ่แล้วจะสร้างจากสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นแบบบัลค์(Bulk) ซึ่งจะมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีค่ากระแสวิกฤตสูง ทำให้ความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ ได้ไม่ดี ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหารูปแบบของชิ้นสารแบบใหม่ๆ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยจะเลือกศึกษาเฉพาะโจเซฟสันชนิดบริดจ์ เนื่องจากสร้างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชั้นเดียว ดังนั้นจึงสะดวกต่อการขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแบบโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น และจะได้เลือกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ [3] เป็นสารที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นโจเซฟสันชนิดบริดจ์ เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว อีกทั้งกระบวนการสร้างก็ไม่ซับซ้อนมากนัก จึงสะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ ซึ่งจะได้ศึกษาถึงคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆต่อไป

3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง [3]

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่สร้างขึ้นนี้จะสร้างขึ้นตามกระบวนการสร้างของ ห้องซูเปอร์คอนดักเตอร์ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. โดยจะเป็นสารเป็นเซรามิกที่ได้จากการนำสารประกอบของ แบเรียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ออกไซด์ และอิทเทรียมออกไซด์ มาผสมกัน โดยมีอัตราส่วนของธาตุอิทเทรียมต่อแบเรียมต่อคอปเปอร์ เป็น 1:2:3 ซึ่งจะได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 77 องศาเคลวิน และสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะเรียกสารประกอบชนิดนี้ว่า $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

การทดลองและผลการทดลอง

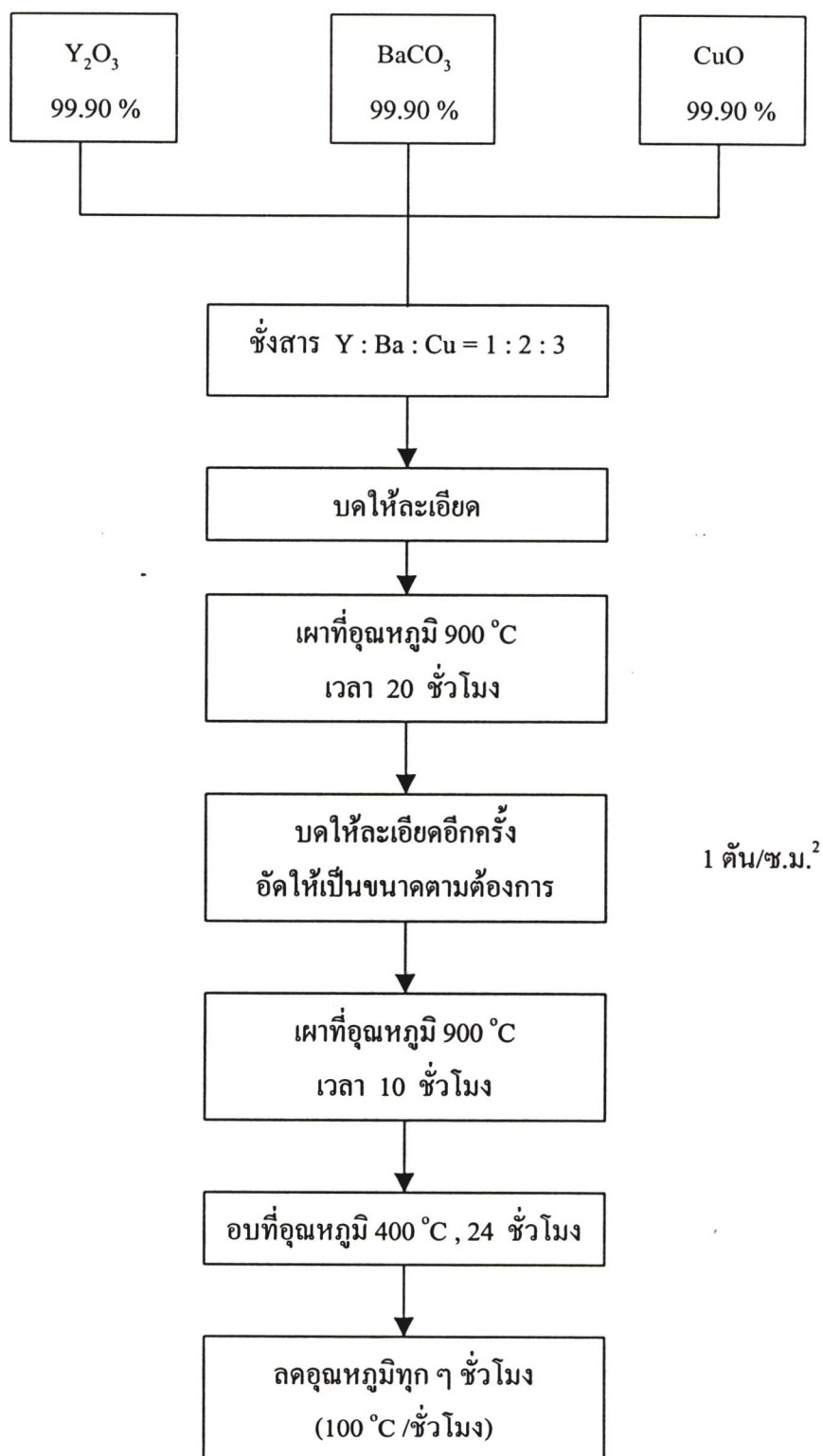
ส่วนประกอบที่สำคัญของ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

1. อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.90 %
2. แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.90 %
3. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.90 %

เมื่อนำส่วนผสมของสารประกอบข้างต้นมาบดกันผสม จนเข้ากันได้ดีแล้ว จึงนำไปเผาด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นสารประกอบจะมีลักษณะเป็นผลึกสีดำ จากนั้นนำสารประกอบที่เผาแล้ว มาบดให้ละเอียดอีกครั้งแล้วทำการอัดเม็ด ด้วยแรงดัน 1 ตันต่อตารางเซนติเมตร ในการสร้างชิ้นสารจากห้องปฏิบัติการนั้น สามารถสร้างได้ทั้งชิ้นสารที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ด ขนาด 0.8 ซม. 1.0 ซม. และ 2.0 ซม. ตามความต้องการในการนำไปศึกษา การประยุกต์ใช้งาน ชิ้นตอนต่อไป จะนำชิ้นสารที่อัดเม็ดเรียบร้อยแล้วมาเผาอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการอบด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำให้เย็นตัวลงช้าๆ โดยลดอุณหภูมิลง ชั่วโมงละ 100 องศาเซลเซียส ก็จะได้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูลอิทเทรียม เพื่อนำไปใช้ศึกษาต่อไป

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง สามารถแสดงเป็นแผนผัง (Flow Chat) และรูปภาพ ประกอบการอธิบายได้ดังรูปที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ชิ้นสารที่สร้างได้นั้น จะถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญก่อนที่จะนำ ศึกษาการประยุกต์ต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

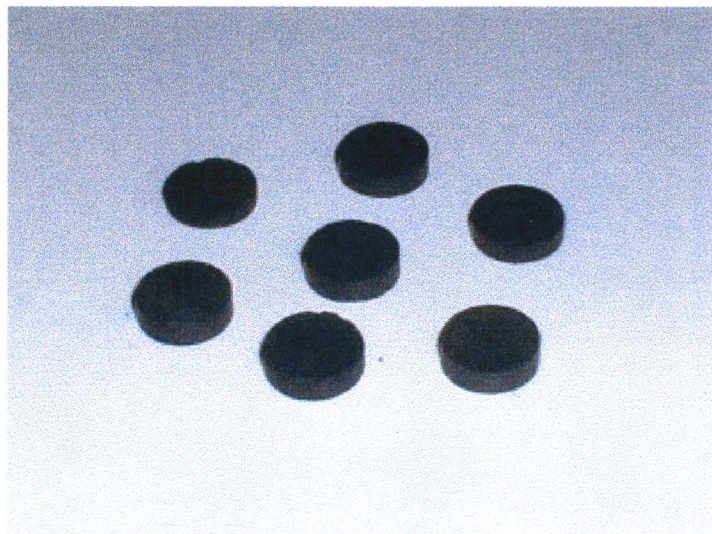


Y₂O₃

BaCO₃

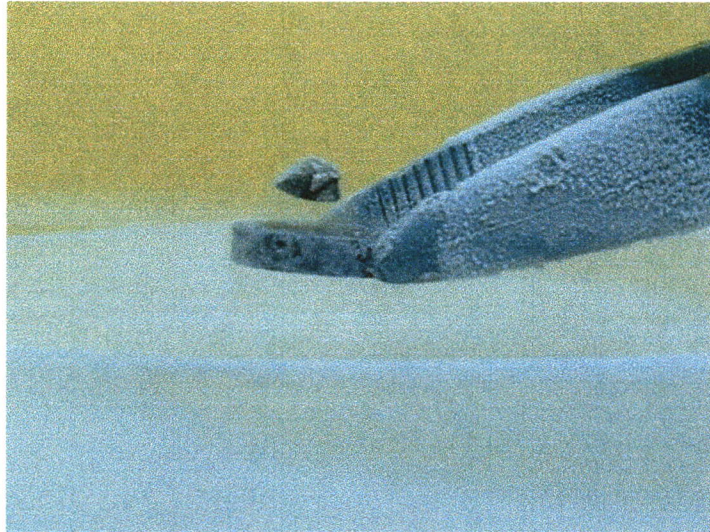
CuO

รูปที่ 3.2 สารประกอบที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.3 ลักษณะเม็ดสารก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็น โจเซฟสันชนิดบริดจ์

ขั้นตอนต่อมา นำแม่เหล็กที่ทำการเผาเรียบร้อยแล้ว มาทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) เพื่อเป็นการยืนยันว่าชิ้นสารนี้ มีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากที่ทราบมาแล้วว่า เมื่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะสามารถแสดงคุณสมบัติต่างๆ อันได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์(Meissner effect) ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance) และปรากฏการณ์ซิลสบี(Silsbee effect) จะเห็นว่าการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เป็นวิธีการที่สะดวกที่สุด ที่จะนำมาทดสอบเพื่อยืนยันว่าชิ้นสารนี้มีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูปที่ 3.4 เมื่อนำแม่เหล็กชิ้นเล็กๆ มาวางเหนือชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะพบว่าชิ้นสารนั้นจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คือ เมื่อชิ้นสารอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวมันได้ เส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กชิ้นเล็กๆนั้น จะผลักกันตัวเองให้ลอยอยู่เหนือชิ้นสาร ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า ชิ้นสารที่ทำการเตรียมได้ มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากขั้นตอนนี้จะได้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่พร้อมจะนำไปขึ้นรูปเป็น โจเซฟสันจังก์ชันบริดจ์และเพื่อที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆต่อไป

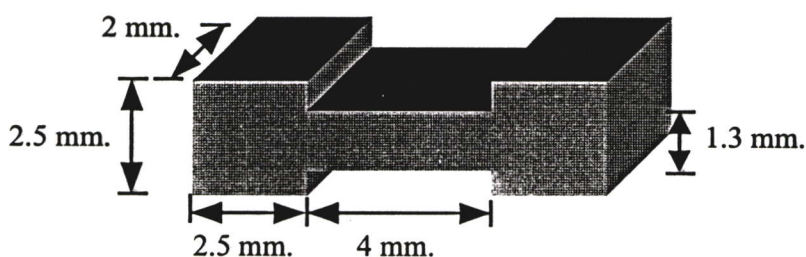
3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

3.2.1 การหาค่ากระแสวิกฤตและค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง สำหรับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ ปรากฏการณ์ซิลส์บี(Silsbee effect) กล่าวคือ เมื่อป้อนกระแสไบอัสให้กับชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นปริมาณมากๆ จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ขึ้นในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากกระแสที่ไหลนี้ จะมีปริมาณมากกว่าค่ากระแสวิกฤต(I_C) แล้วสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนได้ถูกทำลาย จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น จากปรากฏการณ์นี้จะทำให้ทราบค่ากระแสวิกฤตซึ่งก็คือกระแสไบอัสสูงสุดที่ป้อนให้กับชั้นสาร โดยที่ชั้นสารยังมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ และเมื่อนำค่ากระแสวิกฤต มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของการนำกระแส จะได้ค่าความหนาแน่นกระแส(J_C) โดยที่ค่า J_C จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชั้นสาร ไม่ขึ้นกับรูปร่าง

การทดลองและผลการทดลอง

1. นำชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว มาขึ้นรูปเป็นโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ดังรูปที่ 3.5

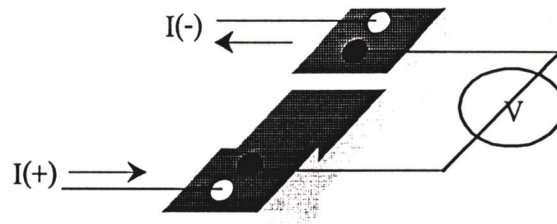


รูปที่ 3.5 โจเซฟสันชนิดบริดจ์

2. ในการขึ้นรูปนั้น จะกำหนดให้ ความหนา(d) มีค่าเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร ความยาว(l) มีค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และให้ค่าความกว้าง(x) มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

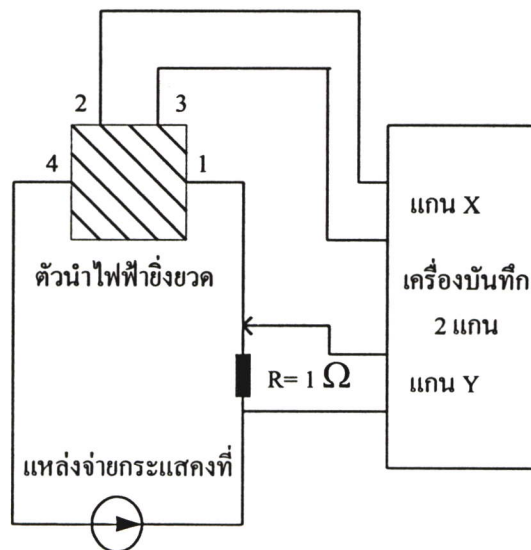
3. จากนั้นนำชั้นสารที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นโจเซฟสันชนิดบริดจ์เรียบร้อยแล้ว มาทำการวัดกริแบบ 4 ขั้ว(Four Point Probe Measurement) ดังรูปที่ 3.6

4. นำไปวัดความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน(I-V Characteristics) เพื่อหาค่ากระแสวิกฤต(I_C) และค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต(J_C)

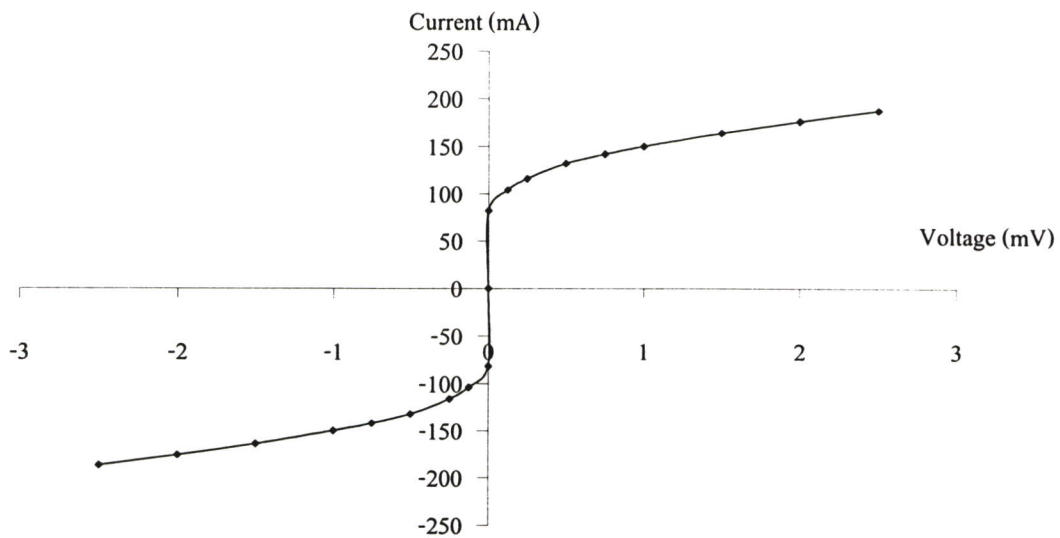


รูปที่ 3.6 การวัดกริแบบ 4 ขั้ว(Four Point Probe Measurement)

สำหรับการวัดความสัมพัทธ์ทางไฟฟ้า ระหว่างกระแสและแรงดัน ทำได้โดยนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นรูปเป็นโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ไปต่อเข้ากับวงจรดังรูปที่ 3.7 โดยให้แหล่งจ่ายกระแสตรง จ่ายกระแสเข้าขั้วที่(1) แล้วออกทางขั้วที่(4) และขั้วที่(2) และ (3) ใช้ในการตรวจสอบแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร โดยต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน และการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นสารวัดได้จาก แรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน ขนาด 1 โอห์ม โดยต่อเข้ากับแกน Y ของเครื่องบันทึกสองแกน แล้วนำชิ้นสารจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นก็ทำการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์

$$\begin{aligned}
 \text{ค่ากระแสวิกฤตของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ (} I_C \text{)} &= 85 \quad \text{mA} \\
 \text{ค่าพื้นที่หน้าตัดของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ (} A \text{)} &= 1.3 \times 2 = 2.6 \quad \text{mm}^2 \\
 \text{ค่าความหนาแน่นกระแส (} J_C \text{)} &= I_C / A \quad (3.1) \\
 &= 85 / 2.6 = 3.27 \quad \text{A/cm}^2
 \end{aligned}$$

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน จะพบว่า เมื่อป้อนกระแสไบอัสในปริมาณน้อยๆ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ จะยังคงรักษาสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวได้ แต่เมื่อเพิ่มกระแสขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง โจเซฟสันชนิดบริดจ์จะเริ่มเสียสภาพนำไฟฟ้าที่ยาว ทราบได้จากจะเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมขึ้นสาร ซึ่งทำให้ทราบค่ากระแสวิกฤต ในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ $I_C = 85 \text{ mA}$ ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการที่กระแสไหลผ่านโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวจะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้าบางส่วนไป ทำให้เป็นเสมือนตัวต้านทาน จึงเกิดมีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้น จากค่ากระแสวิกฤตของบริดจ์จะทำให้ทราบค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว อุณหภูมิสูงชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ทำการสร้างได้ โดยการนำค่ากระแสวิกฤตมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของบริดจ์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $J_C = 3.27 \text{ A/cm}^2$ โดยค่าความหนาแน่นกระแสจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของขึ้นสาร ไม่ขึ้นกับรูปร่างของขึ้นสาร และการทดลองนี้ได้ทำการกลับขั้วกระแสไบอัสที่ให้กับบริดจ์ พบว่าค่ากระแสวิกฤตยังคงมีค่าเหมือนเดิม แสดงว่าคุณสมบัติของบริดจ์จะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางกระแส

3.2.2 ผลของขนาดของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต

คุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ ที่ต้องศึกษาก่อนที่จะนำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ไปประยุกต์ใช้งาน จากหัวข้อ 3.2.1 จะได้ค่ากระแสวิกฤตและค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต ในหัวข้อนี้จะได้ทำการศึกษาต่อว่า หากมีการปรับแต่งรูปร่างของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ แล้วจะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างไร โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวและความหนาของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

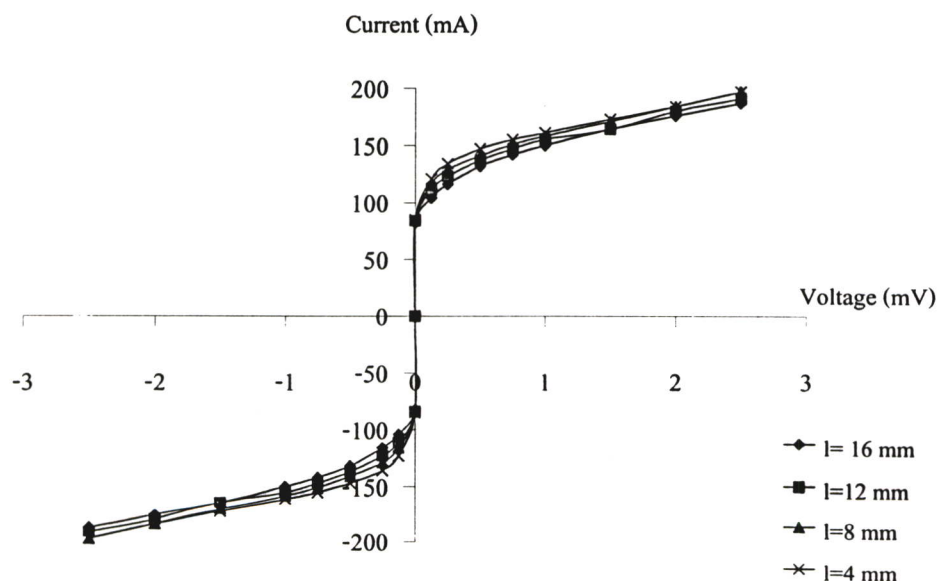
3.2.2.1 ผลของความยาวของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต

การทดลองและผลการทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยให้แสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder)

1. เปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ขนาดต่างๆกัน คือ 4 8 12 และ 16 มิลลิเมตร และกำหนดให้ขนาดความหนา(d)และความกว้าง(x)ของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ มีค่าคงที่เท่ากับ 1.3 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

2. ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ตามการทดลองในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความยาว ต่างๆกัน

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากกราฟรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่มีความยาวต่างๆกัน จะเห็นว่าค่ากระแสวิกฤตของบริดจ์แต่ละความยาวนั้น จะมีค่าใกล้เคียงใกล้เคียงมากหรือเสมือนไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต จากสมการที่ 3.1 $J_c = I_c/A$ ค่าความหนาแน่นกระแสจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชิ้นสาร ไม่ขึ้นกับ รูปร่าง ดังนั้นค่ากระแสวิกฤตจึงขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่หน้าตัดของบริดจ์ คือความกว้างและความหนา ของบริดจ์ ไม่ได้ขึ้นกับความยาวของบริดจ์ และจากกราฟยังจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มขนาดความยาวของ บริดจ์แล้ว เส้นกราฟที่แสดงผลการทดลองจะมีความชันลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทาน ของโโจเซฟสันชนิดบริดจ์ นั้นจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความยาวของบริดจ์นั้นจะแปรผัน ตรงกับความต้านทานของบริดจ์(ขณะที่เสียสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดย)

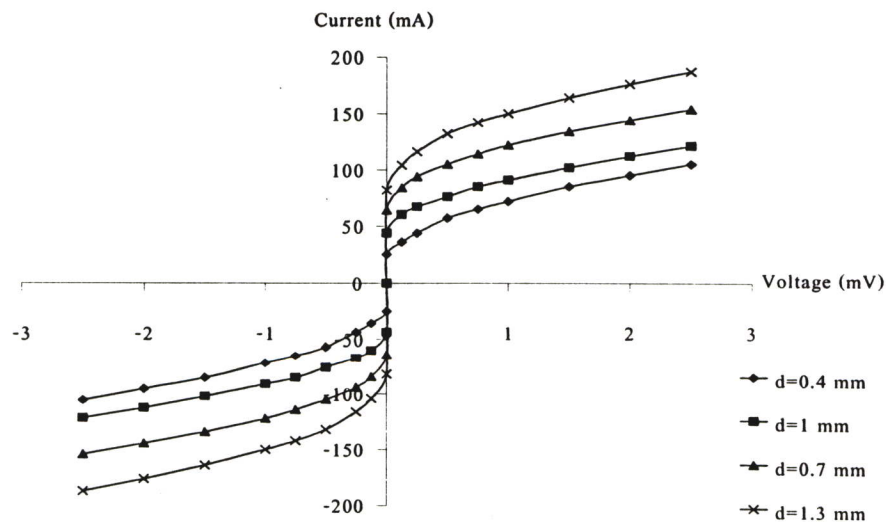
3.2.2.2 ผลของความหนาของโโจเซฟสันชนิดบริดจ์ต่อค่ากระแสวิกฤต

การทดลองและผลการทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.7 แสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึกสองแกน(X-Y Recorder)

1. เปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของโโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความหนา(d)ต่างๆกัน คือ 1.3 1 0.7 และ 0.4 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ความกว้าง(X) และความยาว(L) คงที่เท่ากับ 2 และ 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ

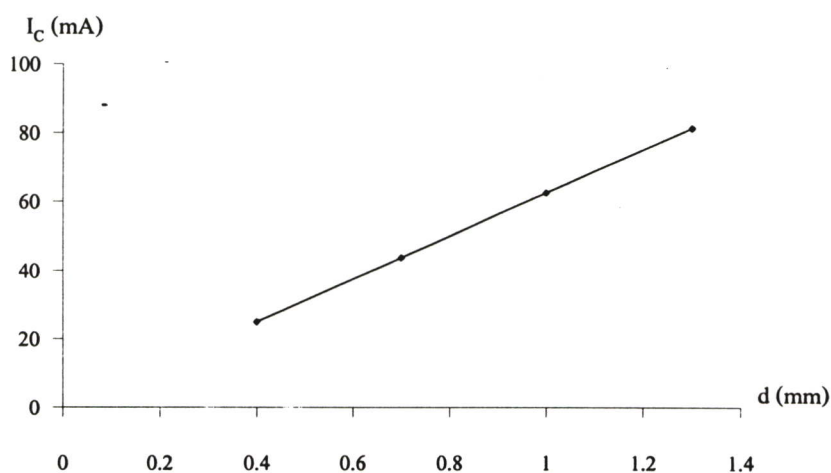
2. ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ตามการทดลองในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่มีความหนาต่างๆ กัน

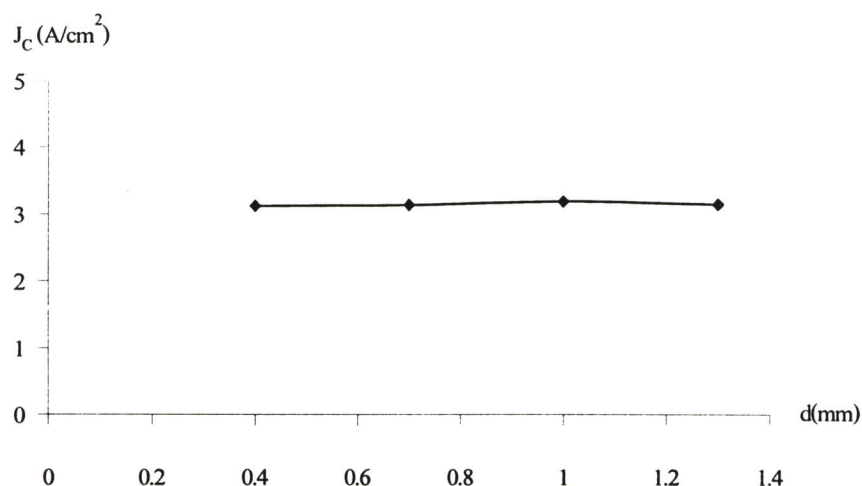
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ตามรูปที่ 3.10 จะทำให้ทราบค่ากระแสวิกฤตของโจเซฟสันที่ขนาดความหนาของบริดจ์ต่างกัน คือ 1.3 1.0.7 และ 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 82 64 44 และ 25 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อขนาดความหนาของบริดจ์มีค่าลดลง ค่ากระแสวิกฤตก็จะมีค่าลดลงด้วย หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ค่ากระแสวิกฤตของบริดจ์จะแปรผันตรงกับขนาดความหนาของบริดจ์ ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่อขนาดความหนาของบริดจ์มีค่าลดลง ก็จะทำให้พื้นที่หน้าตัดบริเวณบริดจ์ มีค่าลดลงไปด้วย ซึ่งการที่มีพื้นที่หน้าตัดลดลงนี้ ก็จะทำให้กระแสไหลได้น้อยลงด้วย ดังนั้นค่ากระแสวิกฤตของบริดจ์จึงมีค่าน้อยลงด้วย ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤตและความหนาของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ค่าความหนาแน่นกระแสของโจเซฟสันชนิดบริดจ์จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชิ้นสาร ไม่ขึ้นกับรูปร่างและจากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ค่ากระแสวิกฤตที่ความหนาต่างๆของบริดจ์ สามารถนำมาคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสของบริดจ์ได้ ตามสมการที่ 3.1 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและความหนาของบริดจ์ที่ ขนาดความหนาต่างๆกัน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสและความหนาของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

จากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นกระแสของโจเซฟสันชนิดบริดจ์นั้นจะมีค่าคงที่เสมอ ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของความหนาของบริดจ์แล้วก็ตาม ดังนั้นจากการทดลองข้างต้นจึงเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า ค่าความหนาแน่นกระแสนั้นจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชิ้นสาร ไม่ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นสาร

3.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็ก

3.3.1 ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์

จากหัวข้อ 3.2 ได้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยการทดสอบคุณสมบัติเรื่อง ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect) ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการที่กระแสไหลผ่านบริดจ์ตามกฎของแอมแปร์จะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะได้ศึกษาถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์ โดยในการทดลองจะได้ทดสอบทั้งสนามแม่เหล็กคงที่และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

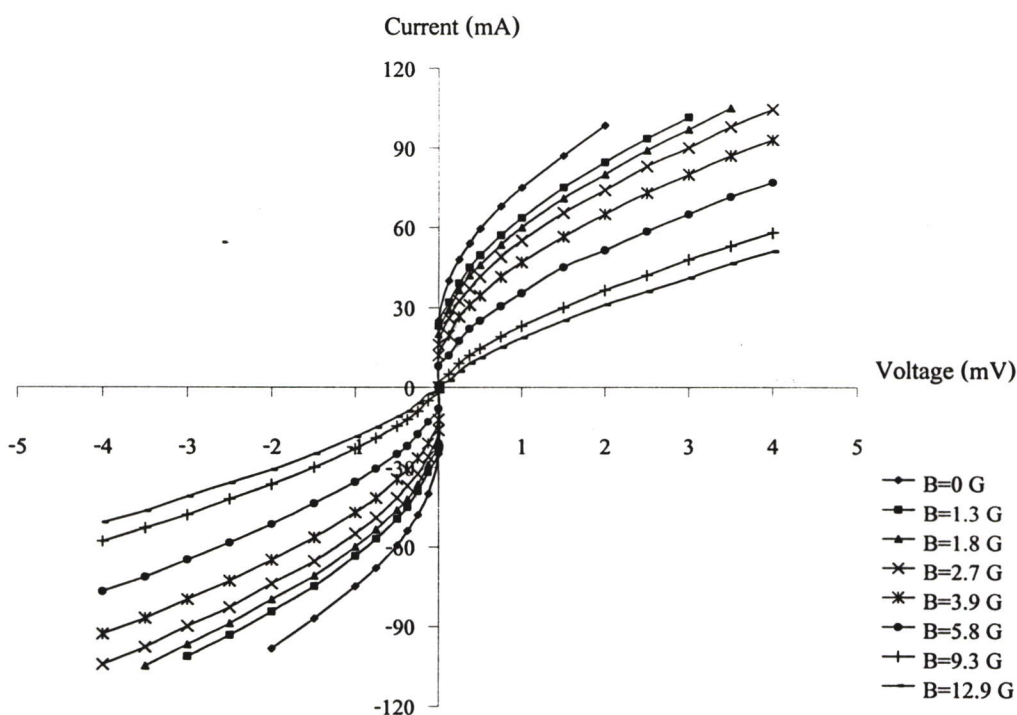
3.3.1.1 ผลของสนามแม่เหล็กคงที่ต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์

การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.7 และวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดัน ของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่สร้างขึ้นได้จากขั้นตอนที่แล้ว ซึ่งมีขนาดความหนา(d) 0.4 มิลลิเมตร ความยาว(l) 16 มิลลิเมตรและ ความกว้าง(x) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน

2. บันทึกผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน(X-Y Recorder) เพื่อดูค่ากระแสวิกฤต (I_c) สูงสุด ขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กคงที่ภายนอก ($B = 0$ gauss)

3. ให้สนามแม่เหล็กคงที่จากภายนอก(B)ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ ที่มีความเข้มเท่ากับ 1.3 1.8 2.7 3.9 5.8 9.3 และ 12.9 gauss ที่โจเซฟสันชนิดจับริดจ์ตัวเดิม ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน และบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤต ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โจเซฟสันชนิดจับริดจ์ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ กัน

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในขณะที่โจเซฟสันชนิดจับริดจ์อยู่ในสภานำไฟฟ้ายิ่งยวด ($T=77$ K) จะสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B=0$ gauss) มากทำได้ประมาณ 25 มิลลิแอมป์ และเมื่อให้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก ที่ขนาดความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆกัน คือ 1.3 1.8 2.7 3.9 5.8 9.3 และ 12.9 gauss และวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน จะได้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 23 20 16 12 8 5 และ 2 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้น จะทำ

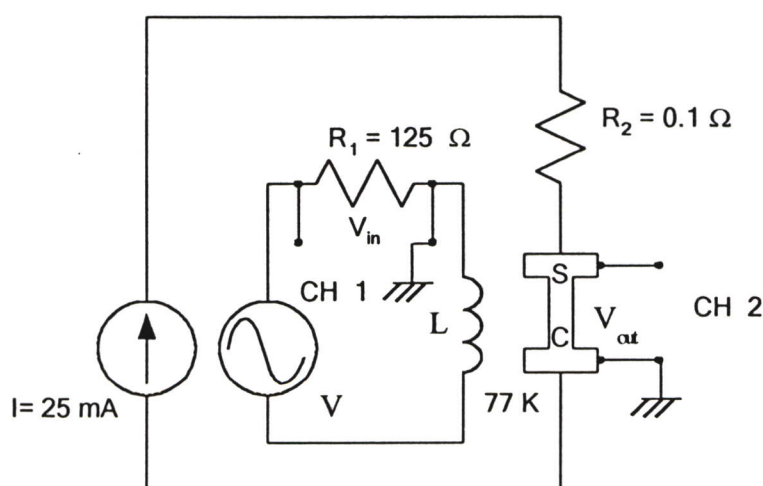
ให้ค่ากระแสวงกุดลดลงหรืออาจจะสรุปได้ว่า ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกับค่ากระแสวงกุดของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

จากสมมติฐานข้างต้นที่ว่า ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B = 0$ gauss) เมื่อทำการเพิ่มค่ากระแสไบอัสกับโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ให้มีค่ามากกว่าค่ากระแสวงกุด (พิจารณาที่ค่ากระแสมีค่ามากกว่า 25 มิลลิแอมป์) จะทำให้เกิดค่าแรงดันตกคร่อมโจเซฟสันชนิดบริดจ์ขึ้น เนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการที่กระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้าบางส่วนไป ทำให้เกิดเสมือนความต้านทานเกิดขึ้น จึงเกิดมีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารบริดจ์ขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้จึงเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังผลการทดลองรูปที่ 3.13 เมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่ากระแสวงกุดก็จะลดลงและเมื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กขึ้นไปอีก สภาพนำไฟฟ้าก็จะถูกทำลายเพิ่มขึ้นไปอีก ดังนั้นค่ากระแสวงกุดก็จะลดลงไปอีกด้วย โดยปริมาณกระแสวงกุดที่ลดลงจะเป็นสัดส่วนตามกันกับความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอก จากคุณสมบัตินี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอย่างง่ายได้ โดยค่าสนามแม่เหล็กจะแสดงผลให้เห็นจากการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันที่ตกคร่อมโจเซฟสันชนิดบริดจ์นั่นเอง ซึ่งขอบเขตความสามารถในการวัดสนามแม่เหล็กครั้งนี้ จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

3.3.1.2 ผลของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์

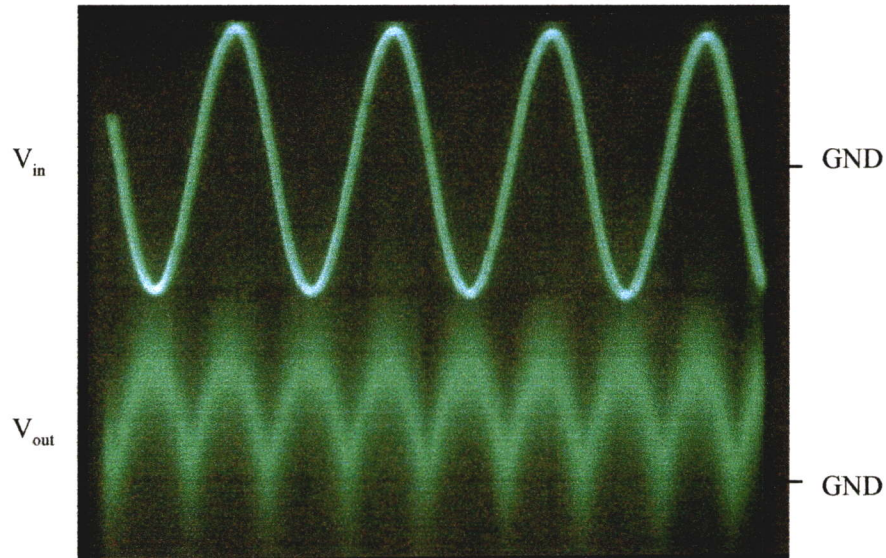
การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

2. นำโฆเซฟสันชนิดบริดจ์ต่อเข้ากับวงจร รูปที่ 3.14 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์แสดงผล ซึ่งค่าแรงดันอินพุตที่ให้ผ่านขดลวด (L) นั้นจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ที่จะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดของโฆเซฟสันชนิดบริดจ์ และทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบริดจ์ นั่นก็คือแรงดันเอาต์พุต บันทึกผลการทดลอง ที่ได้จากการแสดงผลของฮอสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.15



$$V_{in} = 2 \quad \text{V/div} \quad \text{time} = 0.5 \text{ mS/div}$$

$$V_{out} = 2 \quad \text{mV/div}$$

รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลาของโฆเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่ความถี่ 1 kHz

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลา จะเห็นว่าโฆเซฟสันชนิดบริดจ์นั้นจะสามารถตอบสนองต่อสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาได้ โดยจะมีการตอบสนองแบบเรียงรูปสัญญาณเต็มคลื่น (Full wave rectification) กรณีนี้เกิดเนื่องมาจาก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายนอกที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา สนามแม่เหล็กนี้จะไปทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามบริเวณส่วนคอคในบริดจ์ เมื่อมีการขาดออกจากกันของส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้เกิดความต้านทานขึ้นในบริเวณนั้นจึงเกิดแรงดันตกคร่อมบริดจ์ขึ้น โดยไม่ว่าสัญญาณอินพุตที่เข้ามาจะเป็นด้านซีกบวกหรือขั้วเหนือหรือว่าด้านซีกลบหรือขั้วใต้ โฆเซฟสันชนิดบริดจ์ก็จะตอบสนองสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณเอาต์พุตด้านซีกบวกเสมอ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกราฟรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองของโฆเซฟสันชนิดบริดจ์นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับขั้ว แรงดันตกคร่อมบริดจ์นั้นจะเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองนี้

3.3.2 การทดสอบการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

โครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นมีคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีขนาดต่ำๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ที่ค่าสนามแม่เหล็กสูงๆ จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นเกิดสภาพแม่เหล็กปริมาณน้อยๆ ที่ตกค้างอยู่ในตัวมันด้วย โดยทราบได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารนั้นยังคงปรากฏอยู่นั่นเอง ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม โดยจะเรียกว่า ปรากฏการณ์จำสภาพแม่เหล็ก[9,10] ในหัวข้อนี้จึงจะได้ทดสอบการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ เพื่อที่จะหาเงื่อนไขของการเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ซึ่งจำทำให้ทราบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำให้โจเซฟสันชนิดบริดจ์เกิดปรากฏการณ์จำสภาพแม่เหล็ก และได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กคงที่และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ที่มีต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์ในขณะที่มีการจำสภาพแม่เหล็กด้วย

3.3.2.1 เงื่อนไขการเกิดการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

การทดลองและผลการทดลอง

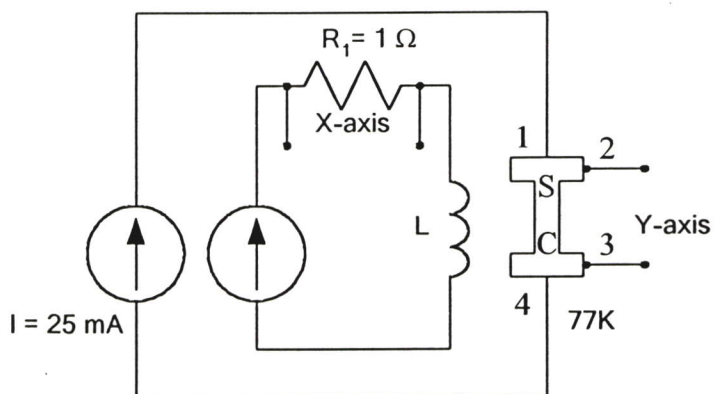
1. วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ขณะที่ไม่มีผลกระทบจากสนามแม่เหล็กภายนอก ($B=0$ gauss) บันทึกผลการทดลองเพื่อหาค่ากระแสวิกฤต (I_C)

2. ให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 1000 gauss (มีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต; H_C) แก่โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวเดิมและวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน บันทึกผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤต

3. นำสนามแม่เหล็กภายนอกออก แล้ววัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันอีกครั้ง บันทึกผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.17

4. นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวเดิม ต่อเข้ากับวงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.16 โดยให้แหล่งจ่ายกระแสตรงต่อเข้าทางขั้วที่ (1) และออกทางขั้ว (4) และขั้วที่ (2) และ (3) ใช้ตรวจสอบแรงดันตกคร่อมโจเซฟสันชนิดบริดจ์ โดยต่อเข้าที่แกน Y ของเครื่องบันทึกสองแกน

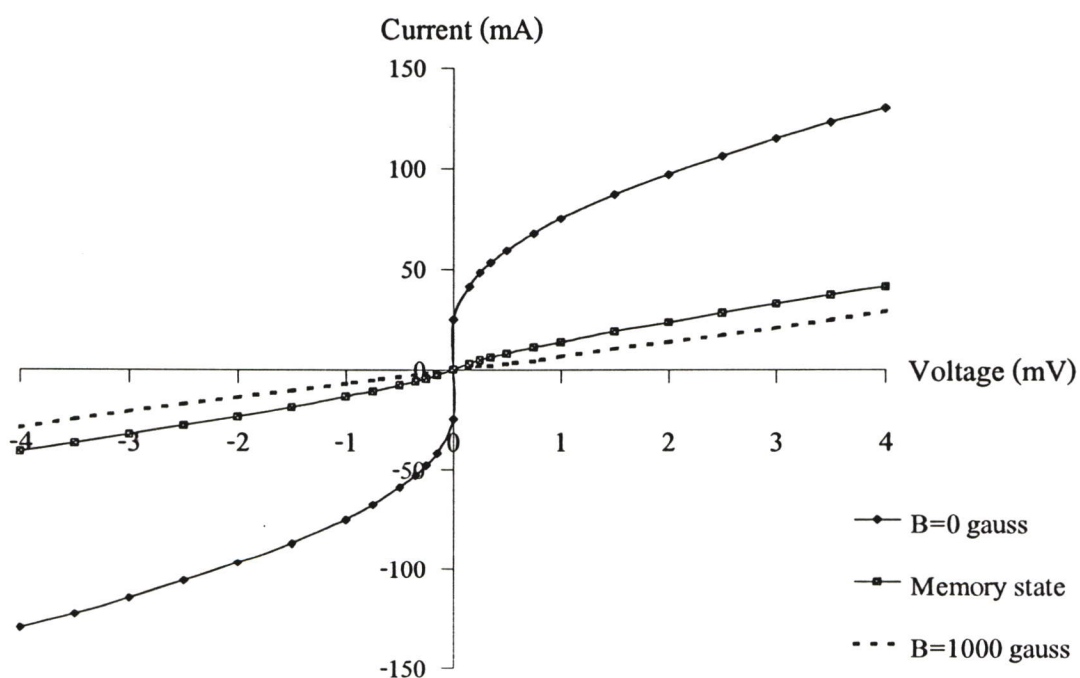
5. ทำการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมบริดจ์กับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยการให้กระแสไบอัสมีค่าเท่ากับค่ากระแสแก่วิกฤตของบริดจ์ จากนั้นแปรค่าสนามแม่เหล็กตั้งแต่ $B=0$ ถึง $B=B_{max}$ ซึ่ง B_{max} คือค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก (ปริมาณสนามแม่เหล็กจะทราบได้จากการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด ซึ่งวัดจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 1 โอห์ม ที่ต่ออนุกรมกับขดลวด) บันทึกค่าแรงดันตกคร่อมบริดจ์



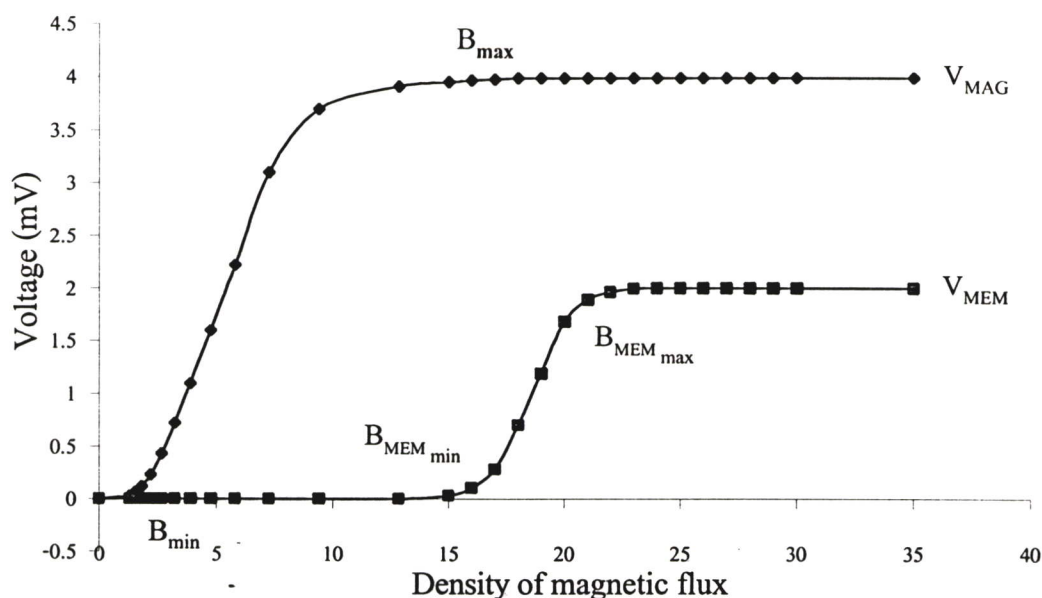
รูปที่ 3.16 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมโจเซฟสันชนิดบริดจ์กับสนามแม่เหล็กภายนอก

6. เพิ่มปริมาณสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากกว่า B_{max} และลดค่าสนามแม่เหล็กลงให้มีค่าเท่ากับศูนย์ บันทึกค่า V_{mem} ซึ่งก็คือค่าแรงดันตกคร่อมบริดจ์ที่ยังตกค้างอยู่นั่นเอง(เกิดการจำสภาพแม่เหล็กแล้ว)

7. แปรค่าสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีค่ามากกว่า B_{max} ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 6 บันทึกผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคกร้อมบริดจ์ (V) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (B)

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 3.17 ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ($B=0$ gauss) สามารถวัดค่ากระแสวิกฤตของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ได้ประมาณ 25 มิลลิแอมป์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีขนาด 1000 gauss ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ นั่นคือบริดจ์นั้นถูกทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอย่างสมบูรณ์ ซึ่งทราบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันขณะนั้นจะมีคุณสมบัติเสมือนตัวต้านทานไฟฟ้าทั่วไป แต่เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นออกไป และวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันอีกครั้ง พบว่าคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์จะไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์ โดยยังคงปรากฏค่าแรงดันคกร้อมบริดจ์ค้างอยู่ ซึ่งจากการทดลองจะมีค่าประมาณ 2 มิลลิแอมป์ นั่นคือโจเซฟสันชนิดบริดจ์เกิดการจำสภาพแม่เหล็กแล้ว

สำหรับเงื่อนไขการเกิดการจำสภาพแม่เหล็กของบริดจ์นั้น ทราบได้จากผลการทดลองรูปที่ 3.18 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคกร้อมบริดจ์ (V) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (B) เปรียบเทียบกันในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กขนาดต่างๆกัน และในขณะที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก

จากกราฟแรงดันคกร้อมบริดจ์ V_{MAG} พบว่าบริดจ์จะสามารถตอบสนองแม่เหล็กภายนอกได้ในช่วง 1.3 ถึง 15 Gauss ซึ่งจะเป็นช่วงที่แรงดันคกร้อมบริดจ์จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น

กับสนามแม่เหล็ก (โดยที่ไม่มีกระแสแม่เหล็ก ทราบได้จากในขณะที่น่าสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว แรงดันตกคร่อมบริดจ์ยังคงเท่ากับศูนย์ ; $V_{MEM} = 0$) สามารถนำไปประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอย่างง่ายได้ โดยกำหนดให้ $B_{min} = 1.3 \text{ gauss}$ คือค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่บริดจ์สามารถตอบสนองได้ $B_{max} = 15 \text{ gauss}$ คือค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่บริดจ์สามารถตอบสนองได้ สำหรับในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากกว่า 15 gauss บริดจ์จะไม่สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ เนื่องจากบริดจ์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ค่า V_{MAG} จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก จะไปทำให้จุดคอดที่มีอยู่ทั้งหมดในชิ้นสารค่อยๆเริ่มขาดออกจากกัน แต่เส้นแรงแม่เหล็กยังไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในวงปิดตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดหรือจุดแทรกภายในชิ้นสารบริดจ์ได้ แต่จะขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ที่สนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่า B_{max}

และกรณีที่ค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่า B_{max} บริดจ์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งขณะนี้บริดจ์ก็จะเริ่มเข้าสู่สภาวะจำสภาพแม่เหล็กเช่นกัน ทราบได้จากเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกแล้ว ก็จะเริ่มมีแรงดันตกคร่อมบริดจ์ (V_{MEM}) ค้างอยู่ โดยจะเรียกค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่ทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็กว่า $B_{MEM_{min}}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16 gauss และเมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กภายนอกขึ้นอีก ค่า V_{MEM} ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง V_{MEM} ก็จะเริ่มคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 mV นั่นคือบริดจ์จะเกิดการจำสภาพแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ โดยจะเรียกค่าสนามแม่เหล็กนี้ว่า $B_{MEM_{max}}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23 gauss จากปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะมีขนาดแรงพอที่จะทะลุเข้าไปในจุดแทรกได้ จุดคอดทุกจุดจะขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์และจุดแทรกจะมีเส้นแรงบรรจุอยู่เต็มทุกจุด

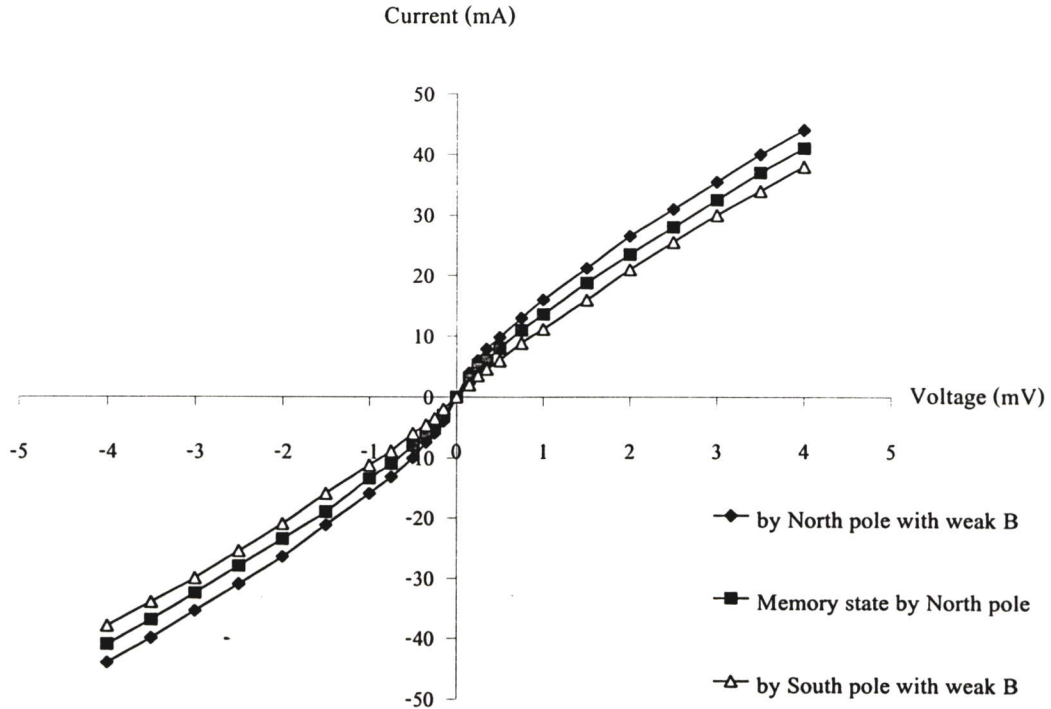
จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ทำให้ทราบเงื่อนไขการเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะนำไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.3.2.2 ผลของสนามแม่เหล็กคงที่ ที่มีต่อการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

การทดลองและผลการทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.7

1. วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่อยู่ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็ก ขนาด 1000 gauss โดยให้อยู่ในสภาวะจำขั้วเหนือ(North pole)
2. ให้สนามแม่เหล็กขนาดอ่อนๆขั้วเหนือ(North pole) และขั้วใต้(South pole) จากนั้นศึกษาผลของสนามแม่เหล็กขนาดอ่อนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ บันทึกผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของโจเซฟสันจังก์ชันบริดจ์ ขณะที่มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วคราวและผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวและชั่วคราว

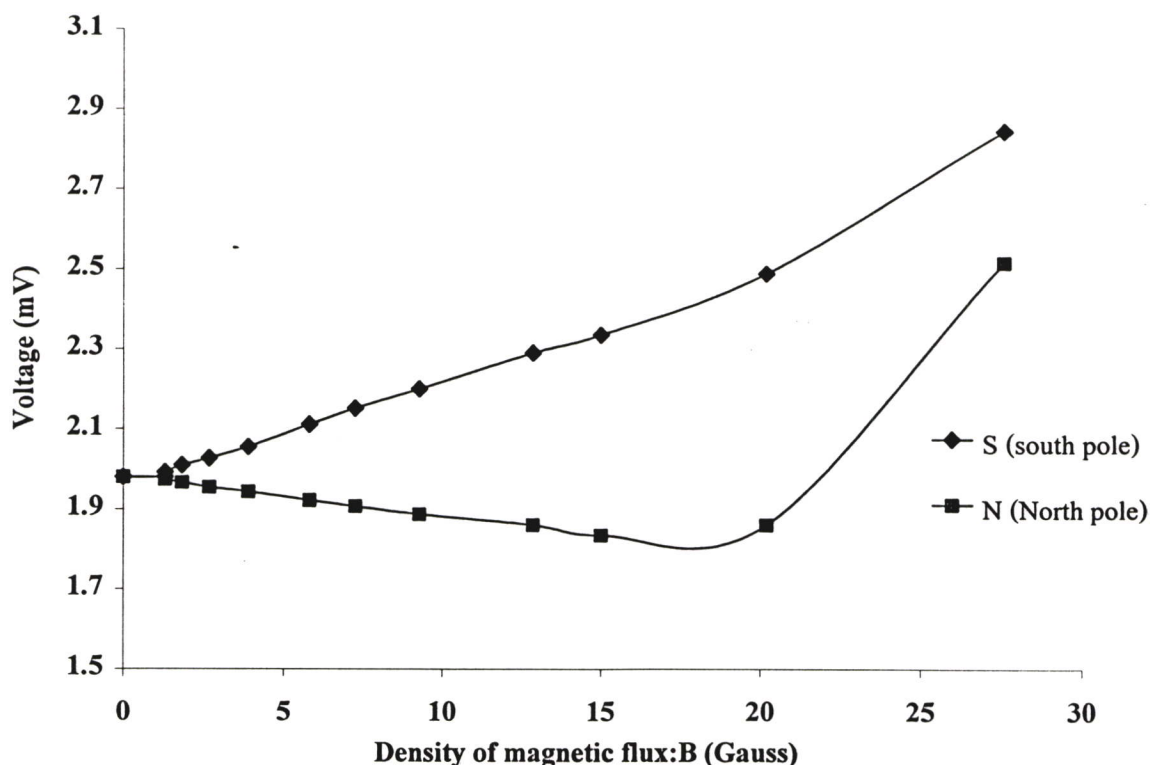
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของบริดจ์ที่มีการจำสภาพแม่เหล็ก 1000 gauss ขณะอยู่ในสถานะการจำแม่เหล็กชั่วคราว เปรียบเทียบกับในขณะที่มีสนามแม่เหล็กอ่อนๆ ชั่วคราวและชั่วคราว พบว่าที่กระแสไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวแรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวแรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าบริดจ์อยู่ในสถานะจำแม่เหล็กชั่วคราว เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวแรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กอ่อนชั่วคราวแรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในขณะที่บริดจ์มีการจำสภาพแม่เหล็กชั่วคราว เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วคราวซึ่งเป็นชั่วคราวข้ามกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ บริดจ์ที่เป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเป็นสารแม่เหล็กไดอะ จะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วน ที่มีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กภายนอก ในที่นี้คือชั่วคราวซึ่งเป็นเส้นแรงทิศเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ จึงเป็นการเสริมกันกับเส้นแรงภายในบริดจ์ ทำให้ปริมาณเส้นแรงภายในมากขึ้น สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงถูกทำลายมากขึ้น ดังนั้นแรงดันตกคร่อมบริดจ์จึงเพิ่มขึ้นด้วย

ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วคราว บริดจ์จะเหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกคือชั่วคราว ซึ่งจะชั่วคราวข้ามกับที่

บริดจ์จําสภาพแม่เหล็กอยู่ จึงเป็นการหักล้างกับเส้นแรงที่บริดจ์จําสภาพอยู่ ทำให้เส้นแรงภายในบริดจ์น้อยลงด้วย สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงถูกทำลายน้อยลง แรงดันตกคร่อมบริดจ์จึงมีค่าลดลงด้วย

โจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่มีการจําสภาพแม่เหล็ก สามารถนำไปประยุกต์เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กอย่างง่าย ที่ใช้ตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและชนิดขั้วดังรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีกว่าโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ไม่มีการจําสภาพแม่เหล็ก ที่สามารถตรวจสอบสนามแม่เหล็กได้เฉพาะขนาดเท่านั้น



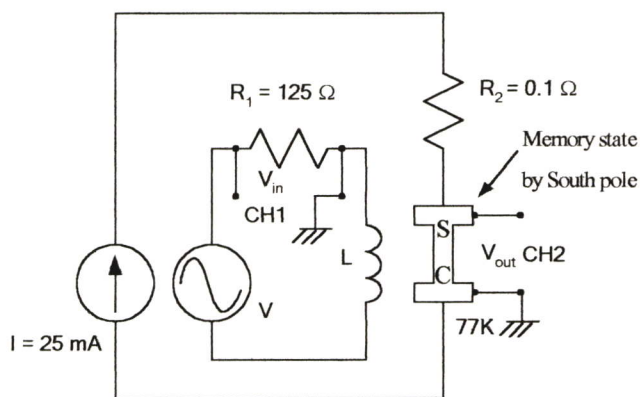
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมโจเซฟสันชนิดบริดจ์ กับสนามแม่เหล็กภายนอก ขั้วเหนือและขั้วใต้ (ในขณะที่โจเซฟสันชนิดบริดจ์ มีการจําสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือ)

จากรูปที่ 3.20 โจเซฟสันชนิดบริดจ์นี้อยู่ในการจําสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือ พบว่ามีแรงดันข้างอยู่ที่ 2 มิลลิแอมป์ และเมื่อให้สนามแม่เหล็กขั้วเหนือแรงดันตกคร่อมจะลดลง แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กขั้วใต้แรงดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงดันตกคร่อมนี้จะเพิ่มและลดลงเป็นสลับส่วนกัน โดยในกรณีค่าแรงดันลดนั้นจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีแรงดันเพิ่ม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าบริดจ์ที่อยู่ในสภาวะจําสภาพแม่เหล็กจะสามารถตอบสนองแม่เหล็กได้ ต่ำสุดที่ 1.3 gauss และสูงสุดที่ 12.9 gauss

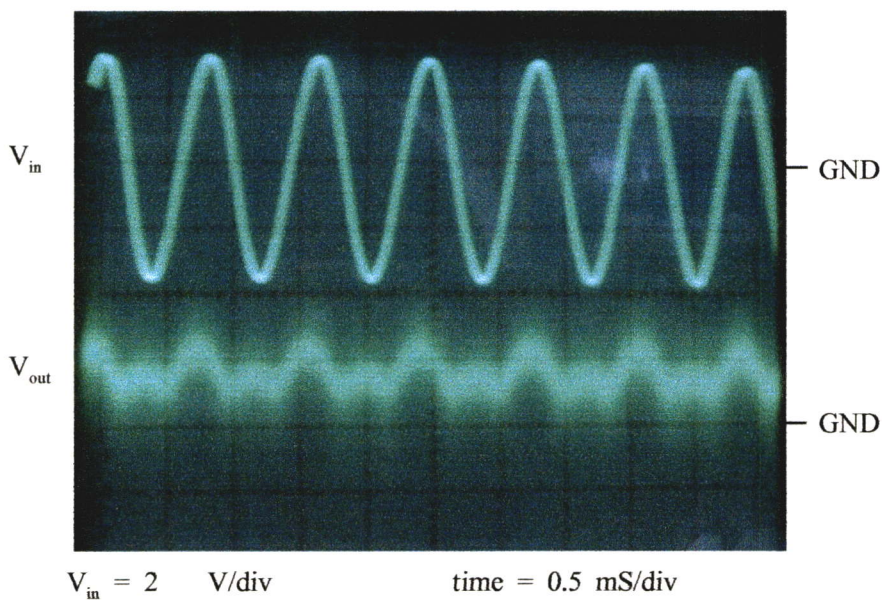
3.3.2.3 ผลของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาที่มีต่อการจำสภาพแม่เหล็กของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์

การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 3.21
2. นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ต่อเข้ากับวงจรรูปที่ 3.21 ปรับกระแสไบอัสที่จ่ายให้บริดจ์เท่ากับค่ากระแสวิกฤต และให้สนามแม่เหล็กภายนอกขั้วได้ 1000 gauss เพื่อให้บริดจ์อยู่ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็ก



รูปที่ 3.21 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ ที่อยู่ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็กต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลาของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็กชั่วขณะ ที่ความถี่ 1 kHz

3. จ่ายสัญญาณแบบสลับจากเครื่องกำเนิดความถี่รูปไซน์ ผ่านขดลวด L โดยให้แรงดันออฟเซตเป็นศูนย์ บันทึกผลการทดลองจากออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.22

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 3.22 ที่กระแสไบอัสเท่ากับค่ากระแสวิกฤต เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกชั่วเหวี่ยงขนาด 1000 gauss โจเซฟสันชนิดบริดจ์จะเข้าสู่สภาวะการจำสภาพแม่เหล็กชั่วเหวี่ยง โดยจะมีแรงดันตกค้างที่บริดจ์ 2 มิลลิโวลต์ และจะเห็นว่าบริดจ์จะตอบสนองต่อสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาโดยสัญญาณเอาท์พุทจะปรากฏเป็นการเรียงสัญญาณแบบครึ่งคลื่น (Half – wave rectification) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.3.2.2 ถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วเหวี่ยงตรงข้ามกันกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกชั่วเหวี่ยงเดียวกันกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ค่าแรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง ซึ่งสามารถนำมาอธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณสนามแม่เหล็กซิกบวกรหรือชั่วเหวี่ยง ซึ่งเป็นชั่วเหวี่ยงตรงข้ามกับที่บริดจ์จำสภาพแม่เหล็กอยู่ แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่ามากขึ้น จึงเกิดเป็นสัญญาณขอดคลื่นซิกบวกร และในทางตรงกันข้ามเมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กซิกลบหรือชั่วเหวี่ยงได้ซึ่งเป็นชั่วเหวี่ยงเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง แต่เนื่องจากปริมาณสนามแม่เหล็กชั่วเหวี่ยงได้มีปริมาณไม่พอที่จะให้ลูกคลื่นใหม่ที่เป็นผลมาจากชั่วเหวี่ยงได้ได้ จึงเป็นเพียงสนามแม่เหล็กที่จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ที่ไปชดเชยเส้นแรงแม่เหล็กภายในบริดจ์เท่านั้น โดยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันตกคร่อมบริดจ์จึงมีค่าประมาณเท่ากับศูนย์

บทที่ 4

การประยุกต์เป็นห้ววัดสนามแม่เหล็ก

แบบวิทสโตนบริดจ์

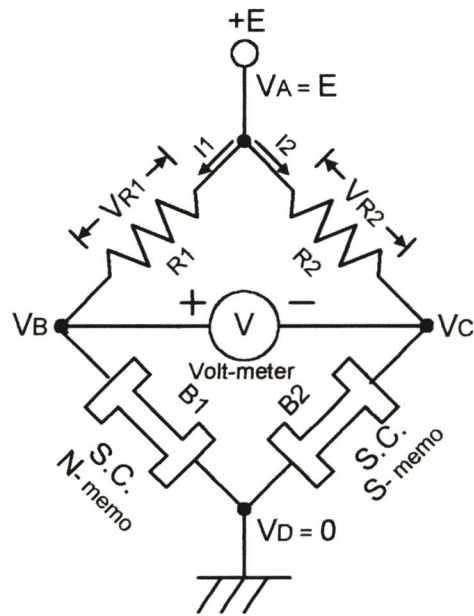
ในการนำโจเซฟสันชนิดบริดจ์มาประยุกต์เป็นห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ในบทนี้ จะได้นำคุณสมบัติต่างๆของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ได้ศึกษามาแล้วในบทก่อนหน้าทั้งหมดมาเป็นพื้นฐาน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก โดยจะได้ศึกษาการตอบสนองของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์นี้ ทั้งสนามแม่เหล็กคงที่และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

4.1 การตอบสนองของห้ววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กคงที่

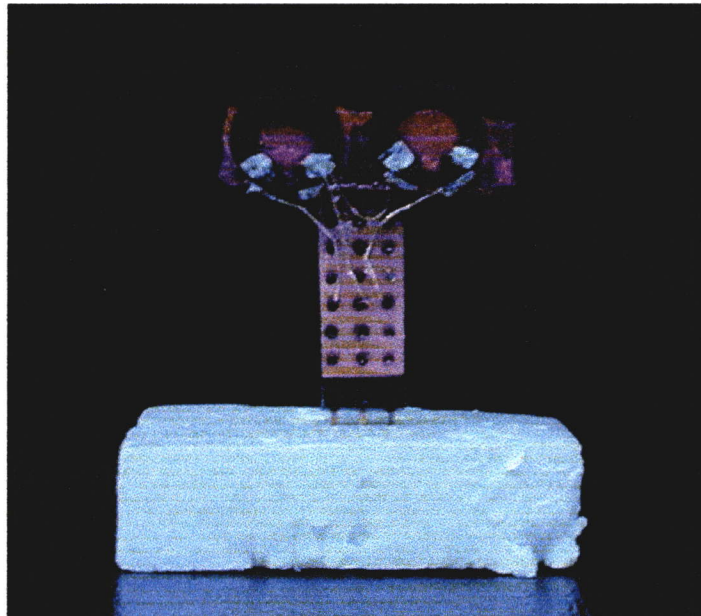
จากบทที่แล้วทราบว่า ขณะที่โจเซฟสันชนิดบริดจ์อยู่ในสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก จะสามารถนำมาประยุกต์เป็นห้ววัดสนามแม่เหล็กได้ โดยสามารถตรวจสอบได้ทั้งขนาดและขั้วของสนามแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กและแรงดันตกคร่อมบริดจ์ ซึ่งจะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมบริดจ์มีค่าน้อย และเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าสนามแม่เหล็ก ทำให้การอ่านค่าไม่สะดวกนัก ดังนั้นจึงได้นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์มาประยุกต์เข้ากับวงจรวิทสโตนบริดจ์ เพื่อให้การแสดงผลมีค่าชัดเจนขึ้น

การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 4.1
2. นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชิ้น ต่อเข้ากับวงจรรูปที่ 4.1 โดยให้จำสภาพแม่เหล็กต่างกัน บริดจ์ตัวที่ 1 (B_1) จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือ และบริดจ์ตัวที่ 2 (B_2) จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้
3. จ่ายแรงดันให้แก่วงจรวิทสโตนบริดจ์ โดยให้มีค่ากระแสเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ จากนั้นปรับความต้านทาน R_1 และ R_2 ให้วงจรวิทสโตนบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุลย์

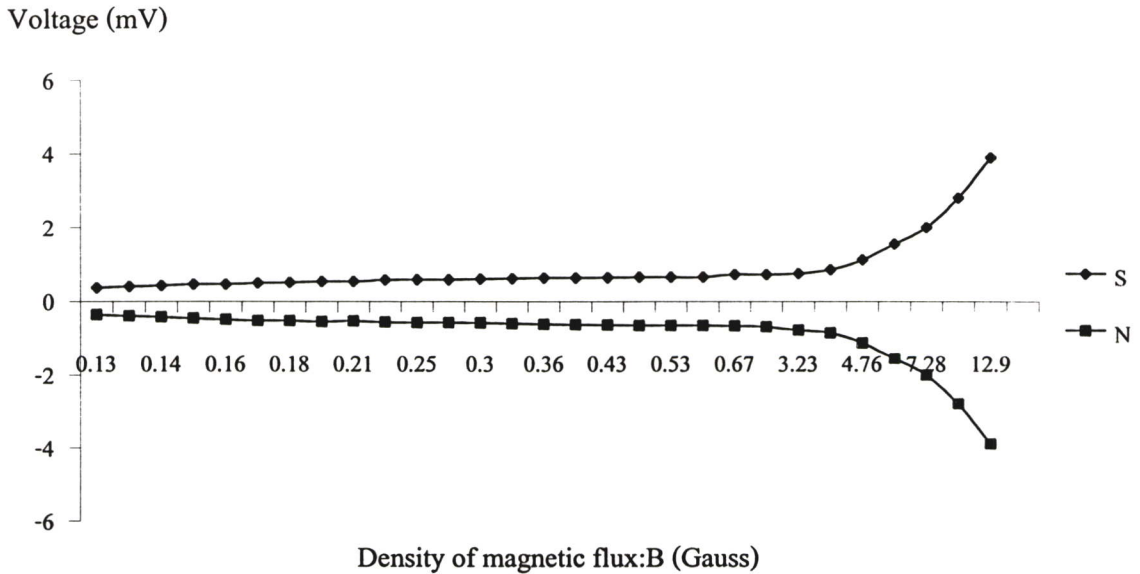


รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กคงที่



รูปที่ 4.2 ชิ้นสาร โจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ใช้เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์

4. ให้สนามแม่เหล็กคงที่ชั่วเหนือและชั่วใต้แก่หัววัดสนามแม่เหล็ก บันทึกค่าแรงดันจากโวลท์มิเตอร์ บันทึกผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้กับแรงดันตกคร่อม วงจรวิทสโตนบริดจ์

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับสนามแม่เหล็กภายนอกทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์พบว่า หัววัดสนามแม่เหล็กจะตอบจับได้ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ ถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นขั้วใต้โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นขั้วเหนือโวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าเป็นลบ ซึ่งเส้นกราฟทั้งสองเส้นจะสมมาตรกัน โดยจะตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ต่ำสุดเท่ากับ 0.125 Gauss และสูงสุดที่ 12.9 Gauss จากการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของวงจรวิทสโตนบริดจ์ในหัวข้อที่ 2.5 และการทดสอบการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันในหัวข้อที่ 3.3.1.1 คือถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีขั้วเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าลดลง และในทางตรงกันข้ามถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีขั้วตรงข้ามกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกขั้วใต้ ขึ้นสารบริดจ์ตัวที่ 1 (B_1) ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนืออยู่ ซึ่งเป็นขั้วตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต้านทานบริดจ์ตัวที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นและในทางตรงข้าม ขึ้นสารบริดจ์ตัวที่ 2 (B_2) ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้ ซึ่งเป็นขั้วเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ค่าความต้านทานภายในบริดจ์ตัวที่ 2 มีค่าลดลงดังนั้นกระแสจะไหลผ่านบริดจ์ตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยกว่า โวลต์มิเตอร์จึงแสดงผลเป็นค่าบวก

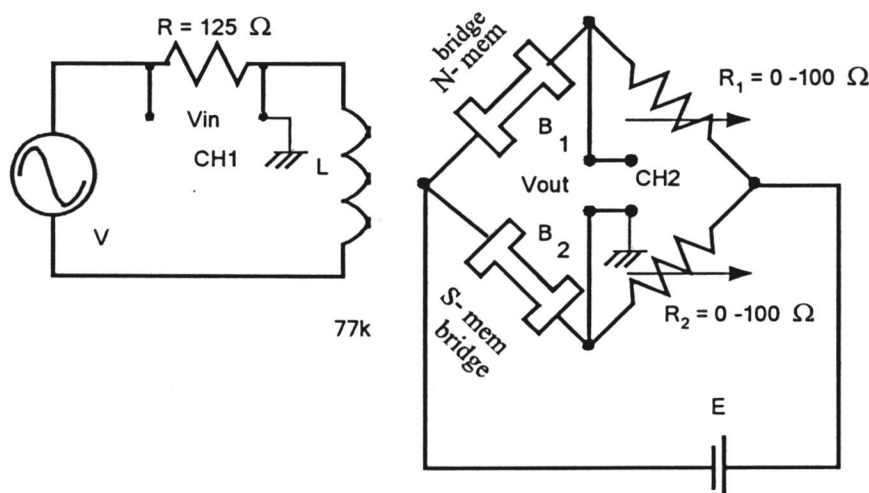
กรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกชั่วขณะ ชั้นสารบริดจ์ตัวที่ 1 ซึ่งจำสภาพแม่เหล็กชั่วขณะจะมีค่าความต้านทานลดลง แต่ชั้นสารบริดจ์ตัวที่ 2 ซึ่งจำสภาพแม่เหล็กชั่วได้จะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะไม่สมดุล กระแสจะไหลผ่านทางชั้นสารบริดจ์ตัวที่ 1 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยกว่า ดังนั้นโวลท์มิเตอร์จึงแสดงค่าเป็นลบ

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวเดียว ในหัวข้อที่ 3.3.2.2 พบว่าหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ จะสามารถตอบสนองกับสนามแม่เหล็กภายนอกได้ต่ำกว่าคือ 0.125 Guass และค่าแรงดันที่แสดงผลจะมีค่าสูงกว่าด้วย

4.2 การตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

การทดลองและผลการทดลอง

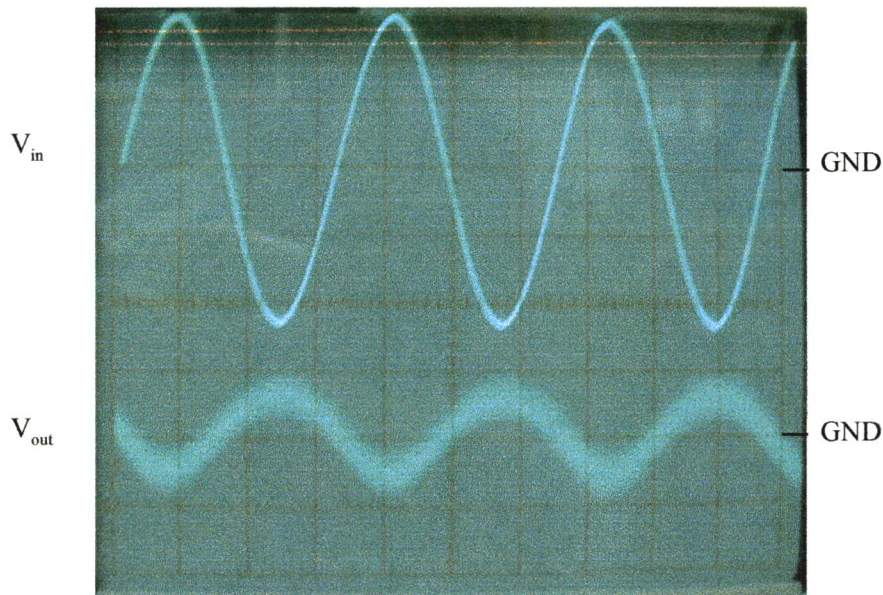
1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชั้น ต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

2. นำโจเซฟสันชนิดบริดจ์ต่อเข้ากับวงจรรูปที่ 4.4 โดยกำหนดให้บริดจ์ตัวที่ 1 จำสภาพแม่เหล็กชั่วขณะ และบริดจ์ตัวที่ 2 จำสภาพแม่เหล็กชั่วได้
3. จ่ายแรงดันให้กับวงจรวิทสโตนบริดจ์ โดยให้กระแสมีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

4. ถ่ายสัญญาณแบบสลับจากเครื่องกำเนิดความถี่รูปไซน์ ผ่านขดลวด L โดยให้แรงดันออฟเซตเป็นศูนย์ บันทึกผลการทดลองจากออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.5



$$V_{in} = 2 \quad \text{V/div} \quad \text{time} = 0.2 \text{ mS/div}$$

$$V_{out} = 2 \quad \text{mV/div}$$

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลา ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชั้น ที่ความถี่ 1.6 kHz

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองรูปที่ 4.5 จากความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตพบว่า บริดจ์จะตอบสนองต่อสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่กลับเฟส (Out – off Phase) กับสัญญาณอินพุต ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1.1 การทดสอบการจำสภาพแม่เหล็กของโจเซฟสันชนิดบริดจ์คือ ถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีขั้วเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพแม่เหล็กอยู่ ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าลดลง และในทางตรงข้ามถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีขั้วเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กชุกบวกรหรือขั้วเหนือเข้ามา บริดจ์ตัวที่ 1 ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนืออยู่ซึ่งเป็นขั้วเดียวกับที่กับสัญญาณสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต้านทานภายในบริดจ์ตัวที่ 1 มีค่าลดลง และในทางตรงกันข้ามบริดจ์ตัวที่ 2 ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้อยู่ซึ่งเป็นขั้วตรงกันข้ามกับสัญญาณสนามแม่เหล็กภายนอก ความต้านทานภายในบริดจ์ตัวที่ 2 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล โดยกระแสจะไหลผ่านบริดจ์ตัวที่ 1 จึงทำให้เกิดสัญญาณยอดคลื่น

ทางซีกลบ ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กซีกลบหรือขั้วใต้ ชั้นสารบริดจ์ตัวที่ 1 ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนืออยู่ ซึ่งเป็นขั้วตรงข้ามกับสัญญาณสนามแม่เหล็กภายนอก ความต้านทานภายในบริดจ์ตัวที่ 1 จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชั้นสารบริดจ์ตัวที่ 2 ที่จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้ ซึ่งเป็นขั้วเดียวกับสัญญาณสนามแม่เหล็กภายนอก ความต้านทานภายในบริดจ์ 2 จะมีค่าลดลง ดังนั้นกระแสจะไหลผ่านบริดจ์ตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าความต้านทานน้อยกว่า จึงเกิดเป็นสัญญาณขดคลื่นซีกบวก

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ที่เกิดการกลับเฟสกันระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ใช้ในการกลับเฟสสัญญาณสนามแม่เหล็กได้ โดยใช้โจเซฟสันชนิดบริดจ์ 2 ชั้นที่มีการจำสภาพแม่เหล็กต่างกันต่อเข้ากับวงจรวิทสโตนบริดจ์

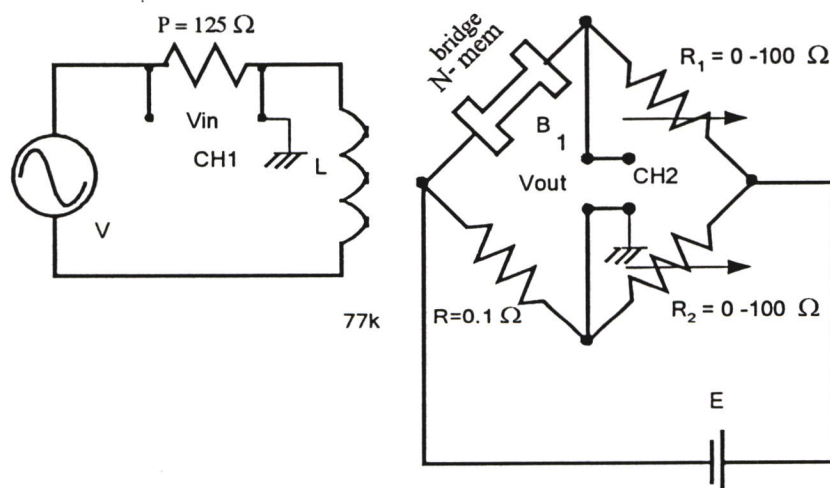
4.3 การวิเคราะห์การกลับเฟสของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์

จากหัวข้อที่ 4.2 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ที่สร้างจากโจเซฟสันชนิดบริดจ์นั้นจะตอบสนองกับสัญญาณสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เป็นการกลับเฟสกัน (Out - off Phase) ระหว่างสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุต เพื่อเป็นการยืนยัน จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยใช้โจเซฟสันชนิดบริดจ์เพียงตัวเดียวเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้น

4.3.1 การตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 1 (จำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือ)

การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 4.6

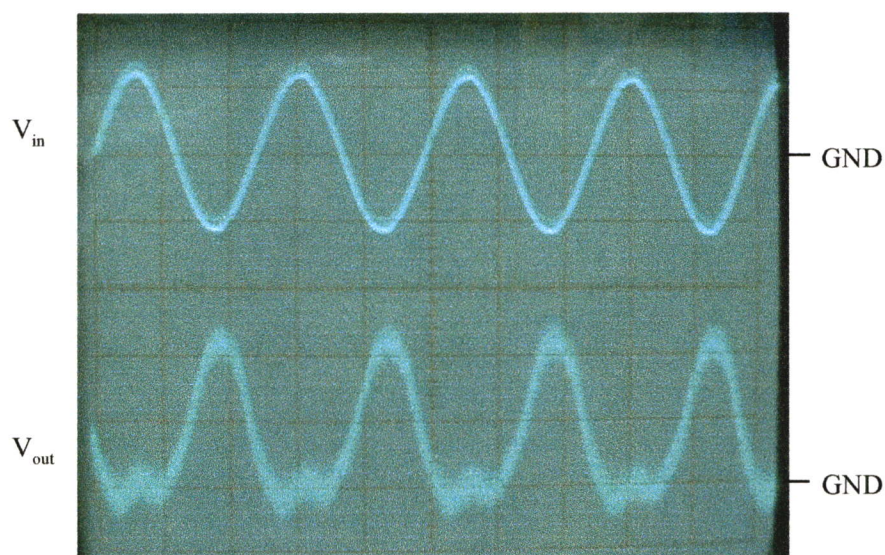


รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 1 ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

2. นำชิ้นสารตัวที่ 2 ออก และแทนที่ด้วยตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม ให้สนามแม่เหล็กชั่ว
 หนี้ยขนาด 1000 Gauss เพื่อให้บริดจ์อยู่ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็กชั่วหนี้ย

3. จ่ายแรงดันให้กับวงจรวิทสโตนบริดจ์ โดยให้กระแสมีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของ
 โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 1

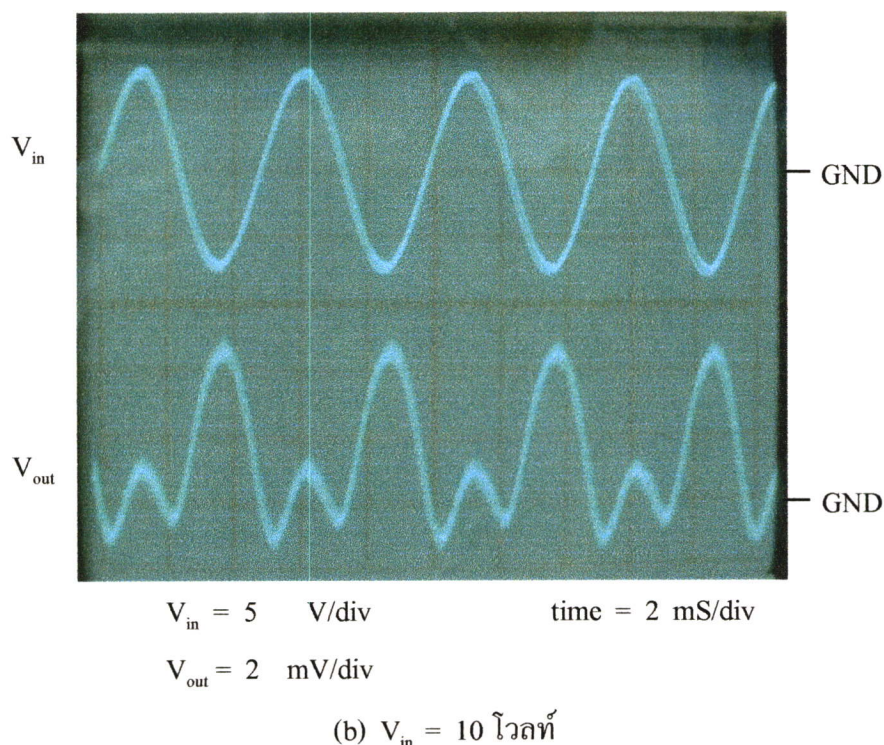
4. จ่ายสัญญาณแบบสลับจากเครื่องกำเนิดความถี่รูปไซน์ผ่านขดลวด L โดยให้แรงดันออฟ
 เซ็ตเป็นศูนย์ บันทึกผลการทดลองจากออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.7



$$V_{in} = 2 \quad \text{V/div} \quad \text{time} = 2 \text{ mS/div}$$

$$V_{out} = 2 \quad \text{mV/div}$$

(a) $V_{in} = 4$ โวลท์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลา ของโจเซฟสันชนิด
บริดจ์ตัวที่ 1 ที่มีการสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือที่ความถี่ 200 Hz (a) $V_{in} = 4$ V ; (B) $V_{in} = 10$ V

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 4.7 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของบริดจ์ตัวที่ 1 ที่มีการสภาพแม่เหล็กขั้วเหนือพบว่า สัญญาณเอาต์พุตจะมีการเรียงสัญญาณแบบครึ่งคลื่น (Half – Wave Rectification) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณซีกบวกหรือขั้วเหนือเข้ามาซึ่งเป็นขั้วเดียวกับที่บริดจ์ตัวที่ 1 สภาพอยู่แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง แต่จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.3.2.2 จะเห็นว่ากรณีแรงดันที่ลดลงเนื่องจากสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแรงดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กขั้วตรงข้าม ดังนั้นจึงไม่เกิดรูปคลื่นลูกใหม่ขึ้น สนามแม่เหล็กที่ให้จึงเป็นเพียงสนามที่จะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขั้วตรงข้ามที่จะไปชดเชยเส้นแรงภายในบริดจ์เท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กซีกลบหรือขั้วได้ ซึ่งเป็นขั้วตรงข้ามกับที่บริดจ์สภาพอยู่ แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงเกิดเป็นยอดคลื่นซีกบวกขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2

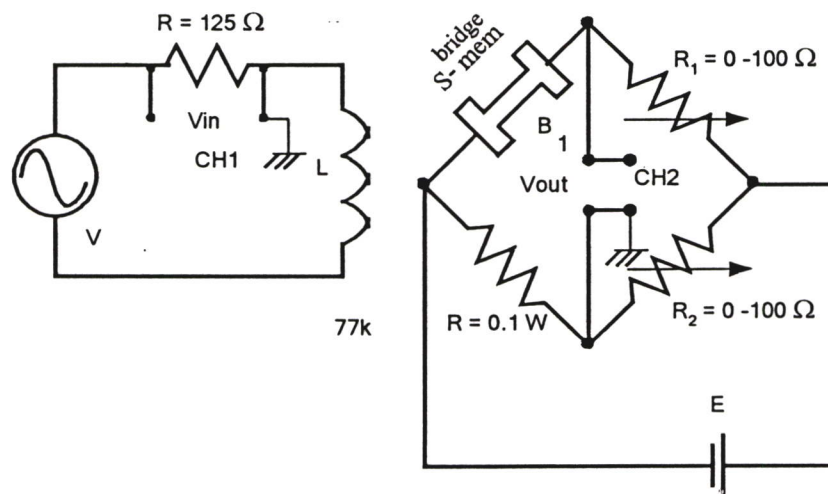
และได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยให้แรงดันอินพุตมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 10 โวลต์ ดังรูปที่ 4.7 (b) จะพบว่าผลจากสัญญาณสนามแม่เหล็กซีกบวกหรือขั้วเหนือจะเริ่มทำให้เกิดลูกคลื่นทางซีกบวก เนื่องมาจากปริมาณสนามแม่เหล็กขั้วเหนือมีค่ามากขึ้น จนสนามเริ่มจะสามารถทะลุผ่านจุดแทรกหรือส่วนที่สภาพแม่เหล็ก ทำให้แรงดันตกคร่อมบริดจ์มีค่ามากขึ้น ความต้านทานบริดจ์ก็

จะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดลูกคลื่นซีกบวกเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กขั้วเหนือ ซึ่งคาดหมายว่า ถ้าเพิ่มแรงดันอินพุตมากขึ้นไปอีก จะทำให้เกิดเป็นการเรียงสัญญาณแบบเต็มคลื่น (Full – Wave Rectification) แต่เนื่องจากเครื่องกำเนิดความถี่รูปไซน์นี้ สามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุด 10 โวลท์ จึงยังไม่สามารถเห็นปรากฏการณ์เรียงสัญญาณแบบเต็มลูกคลื่นได้

4.3.2 การตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 (จำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้)

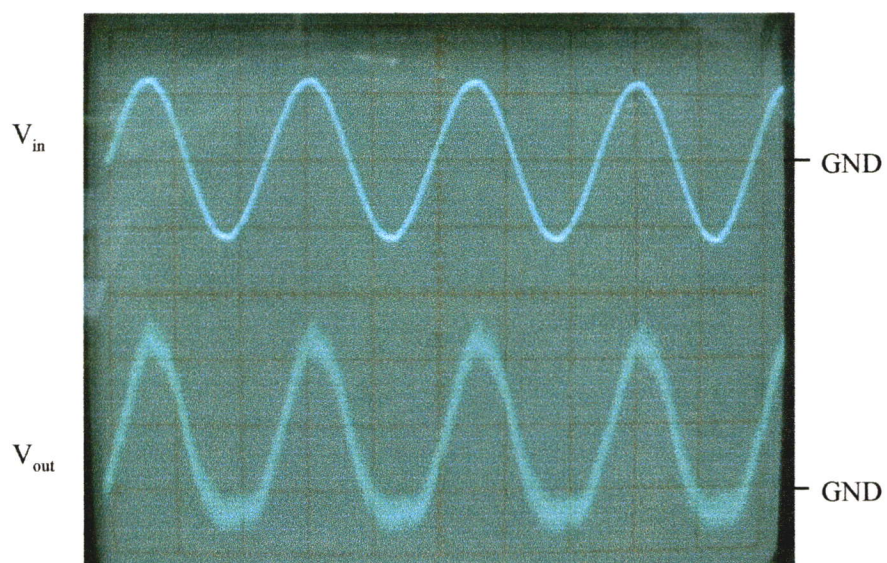
การทดลองและผลการทดลอง

1. จัดเครื่องมือการทดลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรที่ใช้ทดสอบการตอบสนองของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้ต่อสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

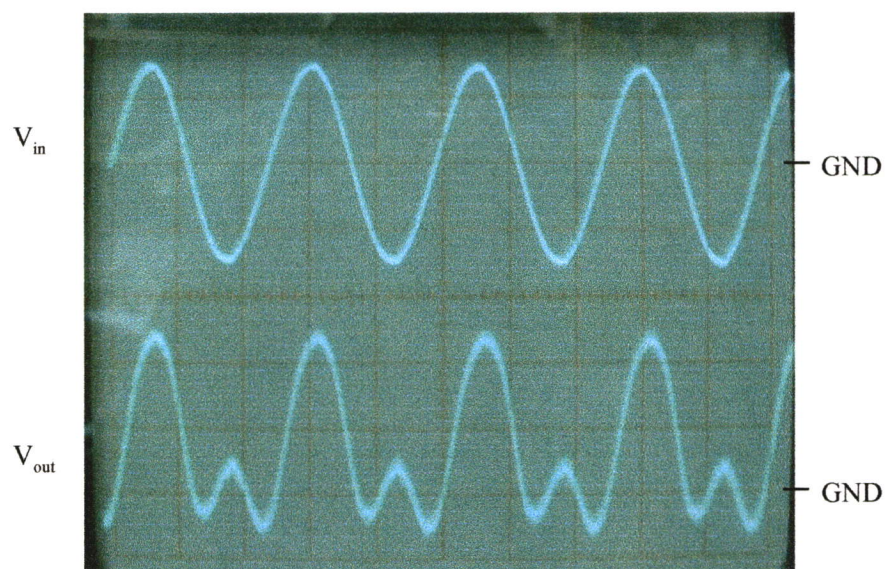
2. ให้สนามแม่เหล็กคงที่ขั้วใต้ขนาด 1000 Gauss แก่โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 เพื่อให้โจเซฟสันชนิดบริดจ์อยู่ในสภาวะจำสภาพแม่เหล็กขั้วใต้
3. จ่ายแรงดันให้กับวงจรวิทสโตนบริดจ์ โดยให้กระแสมีค่าเท่ากับค่ากระแสวิกฤตของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2
4. จ่ายสัญญาณแบบสลับจากเครื่องกำเนิดความถี่รูปไซน์ผ่านขดลวด L โดยให้แรงดันออกเฟ้ดเป็นศูนย์ บันทึกผลการทดลองจากออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 4.9



$V_{in} = 2 \text{ V/div}$ time = 2 mS/div

$V_{out} = 2 \text{ mV/div}$

(a) $V_{in} = 4$ โวลต์



$V_{in} = 5 \text{ V/div}$ time = 2 mS/div

$V_{out} = 2 \text{ mV/div}$

(b) $V_{in} = 10$ โวลต์

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่สัมพันธ์กับเวลา ของโจเซฟสันชนิด
บริดจ์ตัวที่ 2 ที่มีการสภาพแม่เหล็กขั้วได้ ที่ความถี่ 200 Hz (a) $V_{in} = 4 \text{ V}$; (B) $V_{in} = 10 \text{ V}$

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กขั้วได้พบว่า สัญญาณเอาต์พุตจะมีการเรียง สัญญาณแบบครึ่งคลื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อสัญญาณซีกบวกหรือขั้วเหนือเข้ามาซึ่งเป็นขั้ว ตรงข้ามกับที่โจเซฟสันชนิดบริดจ์ตัวที่ 2 จำสภาพอยู่แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิด เป็นยอดคลื่นซีกบวกขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีสัญญาณสนามแม่เหล็กซีกลบหรือขั้วใต้ ซึ่งเป็น ขั้วเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะมีค่าลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลอง ที่ได้กล่าวมาแล้ว

และเมื่อให้แรงดันอินพุตมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 10 โวลต์ จะพบว่าผลจากสัญญาณสนามแม่ เหล็กซีกลบหรือขั้วใต้จะเริ่มทำให้เกิดลูกคลื่นทางซีกบวก เนื่องจากปริมาณสนามแม่เหล็กขั้วใต้ มีค่ามากขึ้น จนสนามเริ่มจะสามารถทะลุผ่านจุดแทรกหรือส่วนที่จำสภาพแม่เหล็ก ทำให้แรงดันตก คร่อมบริดจ์มีค่ามากขึ้น ความต้านทานบริดจ์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดลูกคลื่นซีกบวกเนื่องจาก ผลของสนามแม่เหล็กขั้วใต้ ซึ่งถ้าเพิ่มแรงดันอินพุตมากขึ้นไปอีก ก็จะทำให้เกิดเป็นการเรียง สัญญาณแบบเต็มคลื่น

จากผลการทดลองให้หัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 จึงเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดี ถึงการ กลับเฟสของสัญญาณสลับ ของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวิทสโตนบริดจ์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ เป็นอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ได้ โดยงานวิจัยก็คงจะดำเนินต่อไป

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึง กระบวนการสร้างโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่สร้างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ และการศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแม่เหล็ก และการจำสภาพแม่เหล็ก รวมทั้งการนำโจเซฟสันชนิดบริดจ์นี้มาประยุกต์เข้ากับวงจรวีทสโตนบริดจ์ เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวีทสโตนบริดจ์ สำหรับเนื้อหาที่ได้นำเสนอไปจะสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

โจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะสร้างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิกตระกูลอิทเทรียมแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างแบบเซรามิกมาตรฐานของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโจเซฟสันชนิดบริดจ์พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต (J_c) มีค่าเท่ากับ 3.27 A/cm^2 โดยค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตนี้จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชิ้นสารไม่ขึ้นกับรูปร่างของชิ้นสาร ซึ่งเมื่อทำการปรับแต่งรูปร่างของบริดจ์ค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤตจะคงมีค่าเท่าเดิม และจากการปรับแต่งรูปร่างของบริดจ์นี้เองพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดความยาวของบริดจ์ (l) ค่าความต้านทานภายในบริดจ์ก็จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนด้วย โดยจากการทดลองสามารถทำให้บริดจ์มีขนาดความยาวมากที่สุดเท่ากับ 16 มิลลิเมตร และเมื่อปรับแต่งขนาดความหนาของบริดจ์ (d) พบว่าเมื่อลดขนาดความหนาของบริดจ์ ค่ากระแสวิกฤตของบริดจ์ (I_c) จะมีค่าลดลงอย่างเป็นสัดส่วนด้วย ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัตินี้ทำให้ชิ้นสารโจเซฟสันชนิดบริดจ์ที่ดีที่สุด มีขนาดความหนา 0.4 มิลลิเมตรและความยาว 16 มิลลิเมตร

และได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารโจเซฟสันชนิดบริดจ์ โดยได้ทดสอบการตอบสนองทั้งสนามแม่เหล็กคงที่และสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา กรณีสนามแม่เหล็กคงที่พบว่า แรงดันตกคร่อมบริดจ์จะเป็นสัดส่วนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยสามารถตอบสนองได้ในช่วง 1.3 – 15 Gauss และค่ากระแสวิกฤตจะแปรผกผันกับค่าสนามแม่เหล็กและในกรณีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา บริดจ์จะมีการตอบสนองแบบเรียงรูปสัญญาณเต็มคลื่น (Full – Wave Rectification) และยังสามารถศึกษาเงื่อนไขการเกิดการจำสภาพแม่เหล็กของบริดจ์พบว่า ค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่ทำให้บริดจ์เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก $B_{MEM_{min}} = 16 \text{ Gauss}$ และบริดจ์จะจำสภาพแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ที่ค่าสนามแม่เหล็ก $B_{MEM_{max}} = 23 \text{ Gauss}$ โดยจะปรากฏแรงดันค้างอยู่ที่ 2 มิลลิโวลต์

ในสภาวะที่บริดจ์เกิดการจำสภาพแม่เหล็กนี้ บริดจ์จะสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีขั้วเดียวกับที่บริดจ์จำสภาพแม่เหล็กอยู่

ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าลดลง และในทางตรงกันข้ามถ้าสนามแม่เหล็กมีขั้วตรงข้ามกับที่บริดจ์จำสภาพอยู่ ความต้านทานภายในบริดจ์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และสำหรับกรณีสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา บริดจ์ที่มีการจำสภาพแม่เหล็กจะตอบสนองสัญญาณแบบครึ่งคลื่น (Half – Wave Rectification)

และได้นำ โจเซฟสันชนิดบริดจ์ไปประยุกต์เข้ากับวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit) โดยใช้บริดจ์จำนวน 2 ชั้น ที่จำสภาพแม่เหล็กต่างขั้วกัน เป็นหัววัดสนามแม่เหล็กแบบวีทสโตนบริดจ์พบว่า สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและขั้วของสนามแม่เหล็ก โดยจะตอบสนองแม่เหล็กขนาดต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่สามารถตอบสนองได้เท่ากับ 0.125 Gauss และจากหัววัดสนามแม่เหล็กนี้จะตอบสนองกับสัญญาณสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา โดยสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นการกลับเฟส (Out – off Phase) กับสัญญาณสนามแม่เหล็กอินพุต ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถนำไปประยุกต์เป็นอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ใช้ในการกลับเฟสสัญญาณสนามแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] V.Z.Kresin and Stuart A Wolf. **Fundamental of Superconductivity**. New York and London : Plenum Press. 1990.
- [2] V.Daniel Hunt. **Superconductivity Sourcebook**. New York: John Wiley & Sons. 1989
- [3] ดุลยวัจน์ จอมทอง. “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.”
วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิต
วิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [4] J.D.Kraus, K.R.Carver. **Electromagnetics**. 2 nd ed. New York : Mc GRAW-HILL. 1973.
- [5] W.H.Hay, J.R. **Engineering Electromagnetics**. 5 th ed. New York : Mc GRAW-HILL.
1989.
- [6] A.C.Rose-innes, E.H.Rhoderick. **Tnt. To Superconductivity**. 2 nd ed. UK : Pergamon
Press. 1978.
- [7] Gregory W.D., Mathews W.N. and Edelsack E.A. **The Science and Technology of
Superconductivity**. New York : Plenum Press. 1973.
- [8] Crangle J. **Silid State Magnetism**. London : Edmundsbury Press Ltd. 1991.
- [9] Titiroongruang W. “Study on Electromagnetic Properties of YbaCuO Bulk Superconducting
Material and Its Application.” Doctor of Engineering in Electronic Engineering, Tokai
University. 1995.
- [10] Yukio Akiba, Wisut Titiroongruang, Tateki Kurosu, Masamori Iida and Terutaro Nakamura.
“Electromagnetic Memory Effect in Superconducting Y-Ba-Cu-O System.” Oyobusuri,
Vol.58, No.1, 1989. (in Japan)

ภาคผนวก ก

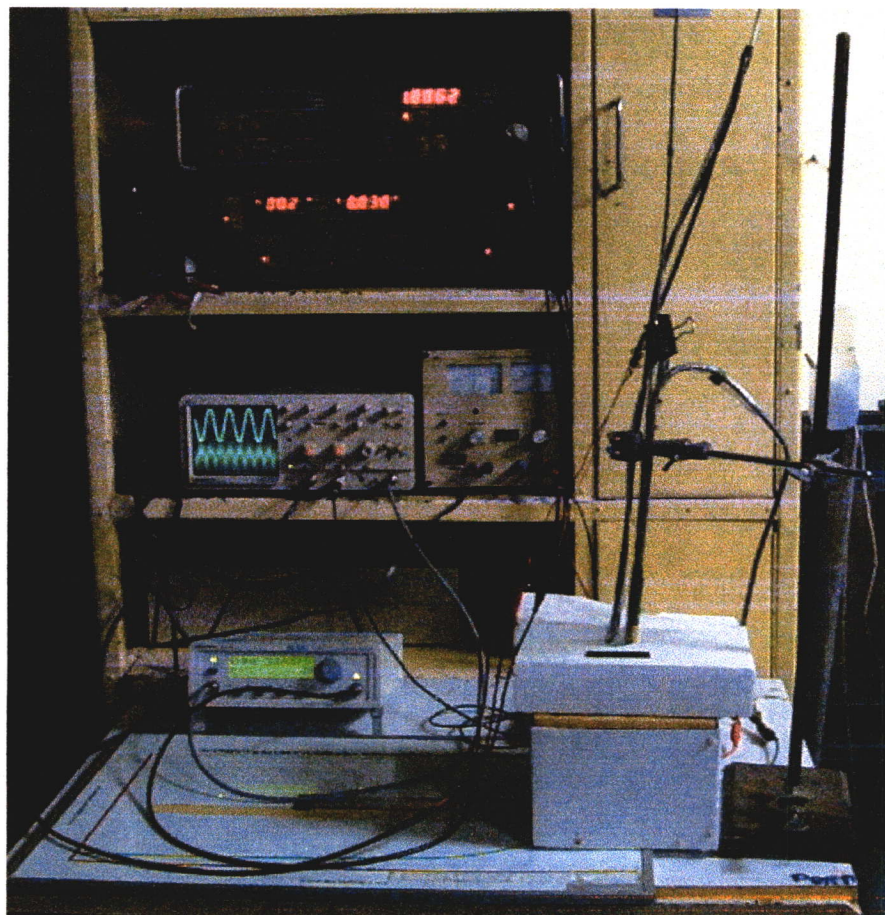
ตาราง ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด



ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°ซ)	จุดเดือด (°ซ)
Y	88.905	1,509	2,927
Gd	157.25	1,312 ± 15	3,270
Ba	137.34	725 ± 5	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.999	-218.8	-183
C	12.011	3,827	3,727



รูปที่ ก-1 เครื่อง Protoble Gauss meter Model HM.201



รูปที่ ก-2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของโจเซฟสันชนิดบริดจ์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายไมตรี สระทองรอด
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2518
สถานที่เกิด	จังหวัดกาญจนบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2539
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	

1. การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อโจเซฟสันชนิดบริดจ์ของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง