

การศึกษาคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO

Studying on Characteristic of GBCO Superconductor



โดย
นายทรงวุฒิ เหล็กสูงเนิน
นางสาวสุวรรณ เขียวไฟดี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 46251
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO
Study on Characteristic of GBCO Superconductor

โดย

นายทรงวุฒิ เหล็กสูงเนิน รหัสประจำตัว 42015218
นางสาวสุรพรรณ เชียรไผ่ดี รหัสประจำตัว 42015246



ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา อีเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO

ผู้จัดทำ

1. นายทรงวุฒิ เหล็กสูงเนิน รหัสประจำตัว 42015218
2. นางสาวสุรารรณ เขียวไผ่ดี รหัสประจำตัว 42015246



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO

นายทรงวุฒิ เหล็กสูงเนิน
นางสาวสุรพรรณ เรือรไฟดี

รศ.ดร.วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

จากการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยการทดลองวัดคุณสมบัติความต้านทานระหว่างกระแสกับแรงดัน พบว่าเกิดความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น นับว่าเป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจซึ่งยังไม่มีผู้วิจัยใดได้ศึกษามาก่อน จากการทดลองสร้างพบว่าอุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส และมีขนาดแรงอัด 1 ตันจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบมากที่สุดและ เมื่อ ได้ทดลองให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปจะพบว่ายิ่งสนามแม่เหล็กจะทำให้ความต้านทานเชิงลบลดลง จากนั้นจึงนำผลที่ได้นี้มาเสนอเป็นสมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อใช้ในการอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดดังกล่าว พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานโครงสร้างมหภาคดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

Study on Characteristic of GBCO Superconductor

Mr. Songwoot Lheksungnoen

Miss Surawan Thienfaidee

Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

Academic Year 2001

ABSTRACT

In studying of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor type, The experimental I-V curve found negative resistance that is very interesting to study. Negative resistance on superconductor have no one to study before. In this experimental found burning in 970 C and compression at 1 ton will be good factor to find negative resistance. Then magnetic field is used in this experimental and found that much magnetic field take negative resistance is decrease. Then resulting is explained by hypothesis of macrostructural model . This experimental can explain by hypothesis of macrostructural model is easy to understand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติการค้นพบสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	1
1.2 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	3
1.2.1 งานทางอิเล็กทรอนิกส์	4
1.2.2 งานด้านระบบกำลัง	4
1.2.3 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์	5
1.2.4 การคมนาคม	6
1.2.5 การทหาร	7
บทที่ 2 คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้า	8
2.1.2 ปฏิกิริยาการวัดการ ไร้ความต้านทานไฟฟ้า	11
2.1.3 ปฏิกิริยาการวัดไมสเนอร์	12
2.1.4 อุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature)	13
2.1.5 ปฏิกิริยาการวัดซิลลบี (Silsee Effect)	14
2.1.6 ปฏิกิริยาการวัดรอยต่อ โจเซฟสัน (Josephson Effect)	14
2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	16
2.2.1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กทั่วไป	16
2.2.2 ความเป็นแม่เหล็ก	17
2.2.3 ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร	18
2.2.3.1 อำนาจแม่เหล็กพารา	18
2.2.3.2 อำนาจแม่เหล็กไดอา	18
2.2.3.3 อำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร	18
2.2.3.4 อำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี	20
2.2.4 แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic Magnetics)	20
2.2.5 สนามแม่เหล็กวิกฤติ (Critical Magnetic Field : H_c)	20
2.3 ประเภทของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และ 2	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance)	23
2.4.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current control negative resistance)	23
2.4.2 ความต้านทานเชิงลบชนิด N (Voltage controlled negative resistance)	24
บทที่ 3 การทดลอง	25
3.1 อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	25
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
3.1.2 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	25
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผา	25
3.1.3.1 เตาเผา (Furnance)	26
3.1.3.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	26
3.1.4 อุปกรณ์การเตรียมสาร	27
3.1.5 อุปกรณ์ในการขึ้นรูปสาร	27
3.1.6 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	28
3.1.7 ชุดวัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์	29
3.1.8 ชุดวัดกรีฮัตตราโซนิก	29
3.1.9 ถังเก็บไนโตรเจนเหลวขนาด 35 ลิตร และ 10 ลิตร	30
3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	30
3.2.1 การคำนวณหาน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง ($GdBa_2Cu_3O_{7-x}$)	31
3.2.2 วิธีการทดลอง ($GdBa_2Cu_3O_{7-x}$)	31
3.2.3 การคำนวณหาน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)	33
3.2.4 วิธีการทดลอง ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)	33
3.2.5 การทดลองหาโมเดล และ การทดลองคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ของ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	35
3.2.6 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	36
3.2.6.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	36
3.2.6.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.6.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ)	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	39
4.1 ผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยยังไม่มี สนามแม่เหล็กมากระทำ	39
4.2 ผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็ก มากระทำต่อชิ้นสาร	43
4.3 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	45
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยการตั้งสมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้าง มหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	47
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อ ยังไม่มีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง	47
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง	50
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	54

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes	1
รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	3
รูปที่ 1.3 แสดงแนวทางการประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	6
รูปที่ 2.1 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพนำไฟฟ้าปกติ (Normal State)	9
รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะ	10
รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	10
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconducting State)	11
รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	13
รูปที่ 2.6 กระแสวิกฤติ	14
รูปที่ 2.7 รูปแบบต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวิคคิงส์ (Weakly-Linked Superconductor)	15
รูปที่ 2.8 (a) การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในอะตอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก (b) อิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กได้อีกทางหนึ่ง	16
รูปที่ 2.9 ลักษณะอิเล็กตรอนสปินของอิเล็กตรอนหลายตัว	17
รูปที่ 2.10 อำนาจแม่เหล็กพารา	18
รูปที่ 2.11 ลักษณะโดเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร	19
รูปที่ 2.12 (a) แสดงการเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร (b) แสดงการเรียงตัวของสารเฟอร์รี	20
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติกับอุณหภูมิ	21
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induce Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (a) ประเภทที่ 1 (b) ประเภทที่ 2	22
รูปที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ชนิดที่เป็นความต้านทานเชิงลบ (b) ชนิดที่ไม่มี ความต้านทานเชิงลบ	23
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)	24
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)	24
รูปที่ 3.1 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1050 องศาเซลเซียส	26
รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผาความร้อนสูง 1050 องศาเซลเซียส	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมสาร	27
รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปสาร	27
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดไฮโดรติกแรงอัดสูงสุด 10 ตัน	28
รูปที่ 3.6 Probe วัดชิ้นสารและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	28
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดปรากฏการณ์ไมสเนอร์	29
รูปที่ 3.8 ชุดบัตรกริดอัตราไซนิกและตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียม	29
รูปที่ 3.9 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว	30
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	32
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	34
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อทดลองหา โมเดลและทดลองคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	36
รูปที่ 3.13 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	36
รูปที่ 3.14 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	37
รูปที่ 3.15 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับชิ้นสาร	38
รูปที่ 4.1 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	39
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นอิตเทียม ที่อุณหภูมิการเผา ที่ 930 องศาเซลเซียสที่แรงอัดขนาด 1 ตัน	40
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดแรงอัด 1 ตัน	40
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.4 ตัน	41
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.6 ตัน	42
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.8 ตัน	42
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 1 ตัน	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.8 วงจรวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็ก ภายนอกมากระทำต่อชิ้นสาร	44
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก มากระทำต่อชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผาที่ 970 องศา แรงอัด 1 ตัน	44
รูปที่ 4.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	46
รูปที่ 4.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ	46
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแบบจำลองโครงสร้างมหภาค	48
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส แรงอัด 1 ตัน	50
รูปที่ 4.14 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก ภายนอกมากระทำโดยมีอุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส แรงอัด 1 ตัน	52

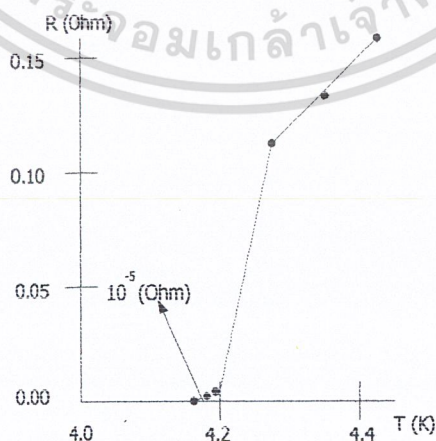
บทที่ 1

บทนำ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีมีความต้านทาน กระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านได้ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนดังที่เกิดขึ้นในโลหะ ปัจจุบันนี้ในบางประเทศมีความก้าวหน้าในการนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้งานได้เป็นอย่างดี เป็นต้นว่า มีการนำเคเบิลตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้แทนเคเบิลโลหะ การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงแทนแม่เหล็กถาวร ในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กลงแต่กำลังสูงขึ้น ใช้ทำชิ้นส่วนทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายสามารถลดขนาดลงได้โดยไม่มีอุปสรรคในเรื่องความร้อน ฯลฯ ในอนาคตจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้อย่างแน่นอนที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะได้รับการพัฒนาจนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น

1.1 ประวัติการค้นพบสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบครั้งแรกในปรอท (Mercury, Hg) เมื่อปี ค.ศ. 1911 จากกราฟความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ ของปรอท ในรูปที่ 1.1 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ลงมาความต้านทานปรอทลดลงเหลือต่ำกว่า 10^{-5} โอห์ม อย่างรวดเร็วและสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้อย่างมาก แสดงว่าปรอทมีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่างไปจากเดิมเมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน เรียกสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) และอุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน คือ อุณหภูมิวิกฤต หรือ อุณหภูมิทรานซิชัน (Critical or Transition Temperature , T_c) ของปรอท



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอท จากการ

ทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes

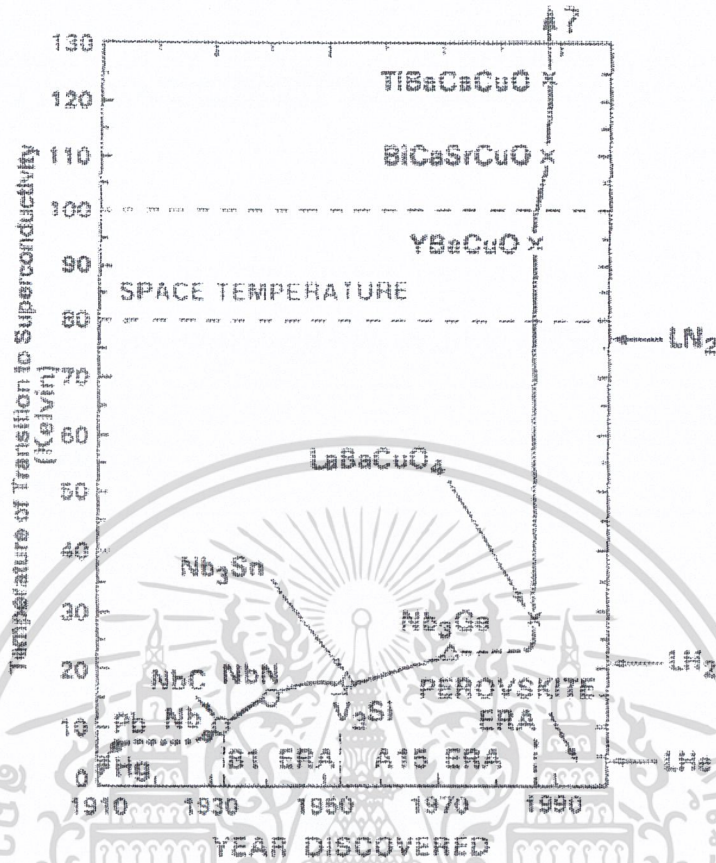
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปรอทจึงเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) ในการทดลองต่อมายังพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในธาตุหลายตัว โลหะผสมจำนวนมากที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้นาย Heike Kamerlingh Onnes ได้รับรางวัล โนเบล สาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913

หลังจากการทดลองของนาย Heike Kamerlingh Onnes ก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้หันมาทดลองค้นคว้าเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดและค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิลดลง 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) ในปี ค.ศ. 1969 ก็สามารเพิ่มอุณหภูมิลดลงเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) นับเป็นครั้งแรกที่ใช้ตัวทำคามเย็นตัวอื่นที่ไม่ใช่ฮีเลียมเหลว จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1986 นาย Karal Alex Muller และนาย Johannes George Bednorz นักวิจัยของ IBM Research Laboratory ทำการทดลองโดยใช้ส่วนประกอบจากอัลลอยด์ของโลหะมาเป็นโลหะออกไซด์ (Metallic Oxide) ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหลายชนิดกับออกซิเจนหรือวัสดุเซรามิก และในเวลา 3 ปีต่อมา ก็ได้ค้นพบสารประกอบที่สามารถเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้จากธาตุแบเรียม – แลนทานัม – ทองแดง – ออกซิเจน คือ $Ba_xLa_{5-x}Cu_3O_{5(3-x)}$ โดยทำการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่อ $x = 1$ และ $x = 0.75$ ได้อุณหภูมิลดลงสูงถึง 35 เคลวิน

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมนักวิจัยของมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแบเรียมเป็นสตรอนเชียม (Sr) ที่มีขนาดเล็กกว่าแบเรียม (Ba) ปรากฏว่าทำให้อุณหภูมิลดลงเพิ่มขึ้นเป็น 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. Chu ได้ทดลองเปลี่ยนธาตุแลนทานัม (La) เป็นธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิลดลงได้สูงขึ้นไป 95 เคลวิน จากอุณหภูมิลดลงนี้ได้สร้างความตื่นเต้นให้กับวงการฟิสิกส์ทั่วโลกเพราะว่าสามารถใช้ในไฮโดรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิลดลงของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของนาย C.W. Chu) เป็นตัวทำความเย็น ในไฮโดรเจนเหลวนั้นนับว่ามีราคาถูกมาก และเตรียมง่ายกว่าตัวทำความเย็นชนิดอื่นที่เคยใช้มา สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้ เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มของ อิตเทรียม – แบเรียม – ทองแดง – ออกซิเจน (มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่ง โครงสร้างแบบนี้คล้ายคลึงกับโครงสร้างเซรามิกประเภท K_2NiF_4 ที่เรียกว่า Perovskites แต่เซรามิกประเภทนี้เป็นชนิดที่มีจำนวนออกซิเจนไม่ครบ หรือเรียกว่า Oxygen Defect Perovskites อุณหภูมิลดลงของธาตุในกลุ่มนี้นับว่าสูงมากเมื่อเทียบกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เคยสร้างมา จะเห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่พบนี้เป็นการทดลองที่อาศัยข้อมูลที่มีอยู่แล้ว มิใช่การพบโดยบังเอิญ นักวิทยาศาสตร์ยังคงตั้งเป้าหมายที่จะสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้ และปัญหาอีกจำนวนมากยังคงต้องถูกแก้ไขใหม่ เช่น ฐานแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสจำนวนมาก ความยากลำบากในการทำให้เป็นเส้น วง และรูปร่างอื่นๆ แต่นักวิจัยส่วนใหญ่เชื่อว่าปัญหานี้จะผ่านพ้นไปได้ ความก้าวหน้าของการพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นสรุปได้ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.2 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้นมีความสามารถเหนือกว่าตัวนำธรรมดา 3 ข้อ ได้แก่

1. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีความต้านทานไฟฟ้าหรือความต้านทานเป็นศูนย์
2. ไม่มีผลของความร้อยเนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย
3. ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านทะลุ

ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงได้รับความสนใจอย่างมากในการที่จะประยุกต์ตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดอุณหภูมิสูงมาใช้งานด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ความไวสูงขึ้นและรวดเร็วขึ้น ตัวอย่างที่พอจะเห็นได้ในตอนนี้ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.1 งานทางอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนองงานทางอิเล็กทรอนิกส์ น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาก เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะพวกวงจรรวม ซึ่งมักจะเป็นวงจรสำเร็จในตัวเดียว ซึ่งได้เปรียบในการใช้งานเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ใหญ่ๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวม นั้น ชับซ้อนทั้งเรื่องผลผลิตและการได้ใจพิพที่ทำการการบรรจุลงตัวถัง การต่อขาโดยใช้ลวด โลหะเชื่อมต่อ จากวงจรรวมมายังขาภายนอก ความร้อนนับเป็นสิ่งสำคัญต่อวงจรรวมรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรรวมที่มีรายละเอียดมากมาย ความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรรวมขณะทำงาน ดังนั้นในการออกแบบผู้ออกแบบวงจรรวมจึงต้องมีการเว้นระยะห่างของตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีที่พอจะกระจายความร้อน ทำให้ต้องสูญเสียพื้นที่ในส่วนนี้ไป แต่ในกรณีที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ในวงจรรวม จะไม่เกิดปัญหาความร้อนตัวอุปกรณ์ในวงจรรวมจึงไม่สามารถออกแบบให้อยู่ใกล้กัน ได้มากซึ่งในกรณีนี้ยังช่วยลดเวลาของการส่งผ่านสัญญาณอีกด้วย

การใช้งานอีกแบบหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ คือรอยต่อ โจเซฟสัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในลักษณะของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่สามารถทำงานเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ได้เป็นร้อยเท่า ถ้านำมาใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมากขณะที่ขนาดเล็กลงมาก รอยต่อโจเซฟสันนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ.2505 โดย Brain Josephson รอยต่อโจเซฟสันประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ส่วนที่ถูกแยกด้วยชั้นกันฉนวนบางๆ อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านชั้นฉนวนได้โดยการสร้างกระแสสูงๆ เราใช้การเปลี่ยนแปลงระดับกระแสในกรณีที่ใช้รอยต่อ โจเซฟสันเป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์

1.2.2 งานด้านระบบกำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเริ่มจาก เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่ภาคจ่ายกำลังผ่านเครือข่ายไปสู่ผู้บริโภค นั้น สามารถจะลดค่าใช้จ่ายและพลังงานไปได้มากเมื่อใช้สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแทนระบบทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่

เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขณะที่ให้กระแสเท่ากันที่ให้ตัวนำธรรมดา จะทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่าและทำงานน้อยกว่ากระแสที่ผลิตได้จะถูกจ่ายออกไปตามโครงข่ายที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหลัก ทำให้ความสิ้นเปลืองลดลงจากระบบทำงานปกติ ซึ่งจะต้องสูญเสียไปประมาณ 20 % ของ ไฟฟ้าที่ได้เข้าไปอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้น

เมื่อพลังงาน ไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นครั้งหนึ่งๆ จะถูกส่งไปยังผู้บริโภคเท่าที่มันผลิตได้เป็นส่วนมาก เนื่องจากปัจจุบัน ไม่มีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานจำนวนมากจึงจำเป็นต้องมีการประมาณว่าผู้บริโภคจะใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณเท่าใด และปรับการผลิตให้เหมาะสมกับความต้องการตามการคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีที่ผู้บริโภคต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าปกติจะมีพลังงานบางส่วนเหลือ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อลดการสูญเสียได้ ระบบ SMES หรือ Superconductor Magnetic Energy Storage ซึ่งเหมือนกับการทดลองของ Omnes ที่ได้เห็นยวนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ลดลงเลยเมื่อเวลาผ่านไป เราจึงสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ยาวนาน ระบบ SMES จะถูกต่ออยู่กับโครงข่ายกำลัง

ประโยชน์ของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าการเก็บและการกระจายพลังงานเท่านั้น สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ยังมีประโยชน์ในการพัฒนาระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน และเครื่องเป่าผม ในวันหนึ่งข้างหน้า อาจจะสร้างด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบตัวนำยิ่งยวด ซึ่งใช้พลังงานน้อยลง และมีขนาดเล็กลงมาก

1.2.3 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์

สาขาวิทยาศาสตร์และการแพทย์ จะได้รับผลดีอย่างมากจากสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวกับกำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรง และการตรวจสอบแม่เหล็กอ่อนๆ

นักฟิสิกส์นั้นได้ใช้ประโยชน์ของแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมานานแล้ว สำหรับใช้กำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรงเพื่อการศึกษากาซของอะตอม ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์นักฟิสิกส์ได้พยายามสร้าง magnetic bottle เพื่อเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่น โดยใช้แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยหวังว่าในอนาคตอันใกล้นี้ จะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่สามารถเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่นได้

สควิดส์ (SQUIDS) เป็นชื่อย่อของ Superconducting Quantum Interference Device สควิดส์ประกอบด้วยรอยต่อโจเซฟสัน 2 รอยต่อที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นวงแหวน รอยต่อโจเซฟสันเป็นชั้นแบบแซนวิชของฉนวนบางๆ ที่อยู่ระหว่างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ชั้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามชั้นบางๆ ได้ตามทฤษฎีที่เรียกว่า tunneling

ถ้าสควิดส์นี้ถูกวางไว้ในสนามแม่เหล็ก แรงดันของกระแสที่มีการไหลสูงสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก สควิดส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงสำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก สควิดส์จึงมักถูกอ้างถึงบ่อยๆ เช่น ในแมกเนโตมิเตอร์ (magnetometer)

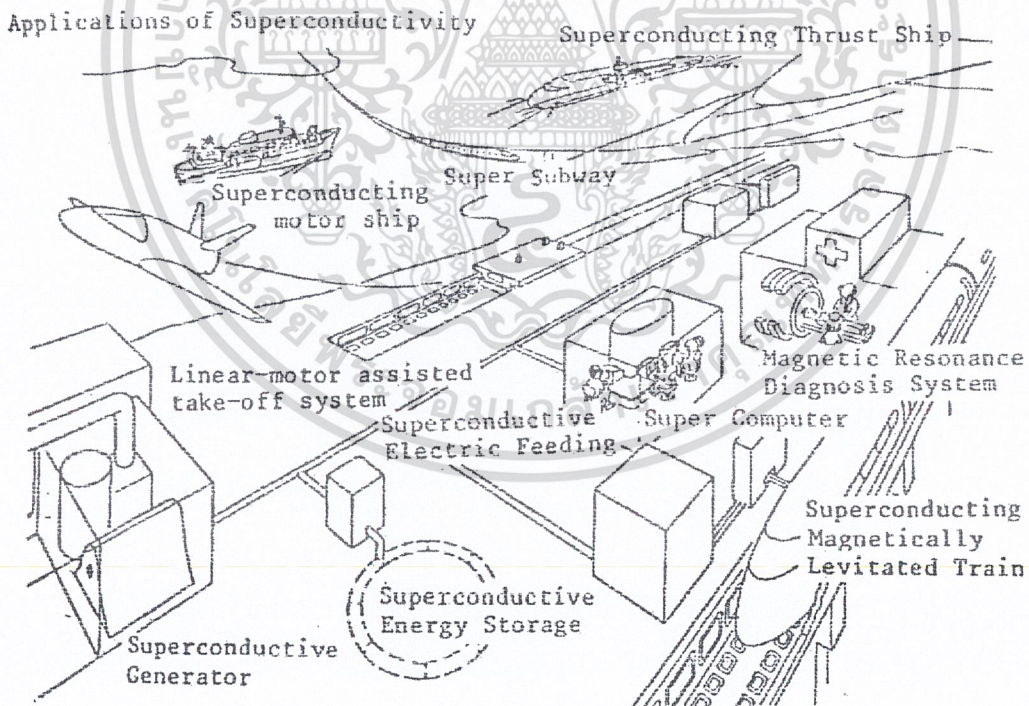
เมื่อเร็วๆ นี้บริษัท IBM ได้ทดลองสร้างสควิดส์โดยใช้วัสดุการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประกอบด้วยรอยต่อ thin film โจเซฟสัน 2 ชั้น มีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ 68 K โดยใช้ในโครงข่ายที่ลดความดันลงแล้วเป็นตัวหล่อเย็น

ในทางการแพทย์สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกนำมาใช้ในเครื่องมือสร้างภาพ ได้แก่ เครื่อง NMR (Nuclear Magnetic Resonance) หรือ MRI (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่งสามารถสร้างภาพรายละเอียดของอวัยวะภายใน ภาพของ MRI คล้ายกับ CAT (Computerized Axial Tomography scanning) เป็นระบบที่ใช้ข้อมูลจากรังสีเอกซ์ในหลายๆมุม แต่ CAT ไม่มีความไวต่อเนื้อเยื่ออ่อน และต้องใช้การแผ่รังสี ส่วน MRI นั้นมีความไวสูงมากถึงเนื้อเยื่ออ่อน และไม่ต้องการการแผ่รังสี เพราะใช้เอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กแรงๆ ที่สร้างขึ้นโดยขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่ง เมื่อร่างกายของคน ถูกฉายด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โปรตรอนในน้ำและอนุภาคอื่นๆ จะเรียงตัวเองให้มีความสัมพันธ์กับ สนามแม่เหล็ก จากนั้นปล่อยพลังงานความถี่วิทยุที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้โปรตรอน ถูกกระตุ้น เมื่อลดการปล่อยพลังงานลง โปรตรอนจะกลับมายังสถานะเดิมและคายพลังงานออกมา พลังงานนี้จะถูกตรวจจับนำมาสร้างภาพ อุปกรณ์ MRI ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกจากนี้ MRI ยังสามารถใช้เป็นเครื่องวัดการไหลของเลือดในบริเวณศีรษะและคอ โดยไม่มีผลกระทบต่อคนไข้ ทำให้สะดวกในการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวกับเส้นโลหิตในสมองและระบบประสาท การใช้ MRI ร่วมกับการ วิเคราะห์ทางเคมีเพื่อตรวจเนื้อเยื่อหัวใจ เพื่อรักษาผู้ป่วยโรคหัวใจ

1.2.4 การคมนาคม

สภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งสามารถนำมาใช้กับการคมนาคมได้หลายทาง แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งสามารถใช้กับรถไฟพิเศษที่วิ่งเหนือราง สามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วมาก มอเตอร์ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งจะถูกนำไปใช้ในเรือ และเรือดำน้ำ



รูปที่ 1.7 แสดงแนวทางการประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถไฟแมกเลฟ (Maglev Trains) เป็นคำย่อของ Magnetically Levitated Train เป็นรถไฟที่มีความเร็วสูงมาก มันจะลอยอยู่เหนือรางประมาณ 4 นิ้ว บนเบาะรองแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่มีความเสียดทานที่ล่อมาจำกัดความเร็ว รถไฟแมกเลฟใช้กฎแม่เหล็กกรรมคา คือ ขั้วของแม่เหล็กที่เหมือนกันผลักกัน ระบบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นกับการออกแบบแม่เหล็กส่วนหนึ่ง ถูกใช้เพื่อยกตัวรถไฟ และอีกส่วนถูกใช้เพื่อการขับเคลื่อนทางทิศทางการที่ต้องการในรถไฟแมกเลฟของญี่ปุ่นนั้น ได้ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำ ซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดอุปกรณ์ทำความเย็นที่หนักมากนี้ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงระยะหลังนี้ใช้ระบบทำความเย็นจาก ไนโตรเจนเหลวก็พอเพียง แต่มันก็ยังมีปัญหาด้านคุณสมบัติบางอย่างที่ยังจำกัด

1.2.5 การทหาร

การใช้ประโยชน์ในด้านการทหารก็เกี่ยวข้องกับหลักการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้งงานวิจัยในด้านการทหารยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถนำไปใช้ได้บนเรือรบทหาร และเรือดำน้ำ เรือขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ซึ่งมีส่วนประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำได้เคยถูกสร้างขึ้นทดสอบ เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

Rial guns หรือตัวมวล ใช้เพื่อเร่งลูกกระสุนปืนใหญ่เพื่อให้มีความเร็วสูงมาก หลักการง่ายๆ คือ กระสุนจะถูกเร่งอย่างทันทีตามทางที่ชี้วงแหวนสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Rial guns นี้ อาจจะถูกนำไปติดตั้งบนรถถัง หรือเรือ นอกจากนี้ก็ยังมี Lasers และอุปกรณ์พวกตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความสำคัญมาก สามารถถูกนำไปใช้งานได้กว้างขวาง และนับว่าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีปัจจุบันสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการค้นคว้าและค้นพบ ขยายวงกว้างออกไปทั่วโลก ขณะที่นักวิทยาศาสตร์เร่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ค้นพบได้ใหม่ๆ ในแต่ละวัน วิศวกรก็กำลังพยายามเปิดช่องทางเข้าสู่เทคโนโลยีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อการใช้งาน บริษัทเอกชนต่างๆ กำลังมองหาโอกาสและช่องทางการค้าที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นการแข่งขันระหว่างห้องปฏิบัติการ บริษัทและนักวิจัย จึงเพิ่มมากขึ้น

การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อให้ใช้ได้ที่อุณหภูมิห้องจะเป็นสิ่งที่ใฝ่ฝันในประโยชน์กับอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นอย่างมาก ซึ่งห้องปฏิบัติการหลายแห่งกำลังศึกษาและรายงานอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อพยายามสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจริงๆ นอกจากนี้ความพยายามส่วนมาก ยังมุ่งตรงไปที่การพัฒนาประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอนาคต นักวิทยาศาสตร์อีกส่วนหนึ่งก็พยายามอธิบายว่าทำไมสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงจึงเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโลหะสารกึ่งตัวนำ และสารประกอบต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ทันที อุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ หรือเกิดการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) และสารที่มีการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor)

มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์หรือเกือบจะเป็นศูนย์ และได้สังเกตกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตลอดระยะเวลา มากกว่าหนึ่งปี ปรากฏว่ามันยังไหลอยู่เช่นเดิม เรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนเป็นกระแสไฟฟ้าคงสภาพ (persistent current) ไฟล์ (File) และมิลล์ (Mills) ได้ทำการทดลองและวัดเวลาสลายตัว (decay time) ของกระแสไฟฟ้า โดยใช้วิธีอภิณาตด้วยแม่เหล็กนิวเคลียร์ (nuclear magnetic resonance) วัดสนามแม่เหล็กสัมพันธ์กับกระแสยิ่งยวด (supercurrent) เขาทั้งสองสรุปว่า เวลาสลายตัวของกระแสยิ่งยวดนี้มีไม่น้อยกว่าหนึ่งแสนปี

การศึกษาศสมบัติทางสนามแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด มีผลมากเหมือนกำแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กอ่อนๆ มันจะประพุดตัวเหมือนกับสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) อย่างสมบูรณ์ด้วยสนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์ โดยหลักการความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันทีเมื่อเราลดอุณหภูมิวิกฤต ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect)

2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

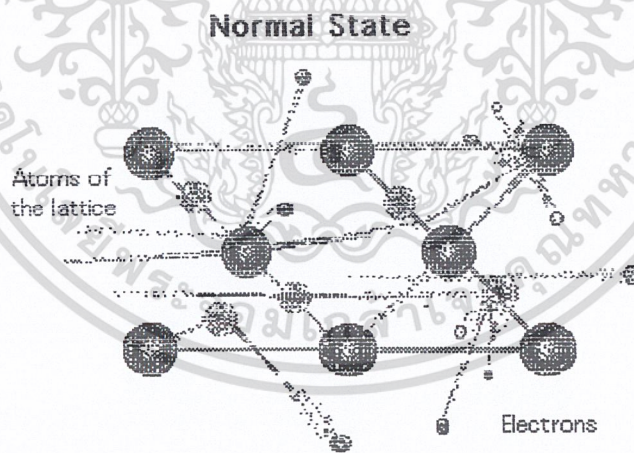
2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้า

สภาพการนำไฟฟ้า (Conductance) ของวัสดุใด ก็คือส่วนกลับของสภาพต้านทานหรืออาจอธิบายได้ในเทอมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเนื่องจากถือกันว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางกระแสไฟฟ้า วัสดุที่เป็นฉนวน เช่น ยาง แก้ว อิเล็กตรอนในอะตอมถูกยึดเหนี่ยวไว้ให้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุฉนวนจึงมีความต้านทานสูง ส่วนอิเล็กตรอนในตัวนำไฟฟ้าถูกยึดเหนี่ยวไว้อย่างหลวมๆ จึงเคลื่อนที่ในตัวนำไฟฟ้าได้แต่ไม่เป็นระเบียบนักเนื่องจากมีการชนกัน ความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะความร้อนมีผลให้อิเล็กตรอนชนกันมากขึ้น สำหรับในตัวนำที่มีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีความต้านทานอยู่เลยเพราะอิเล็กตรอนเคลื่อนที่กันไปเป็นคู่ๆ โดยไม่มีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

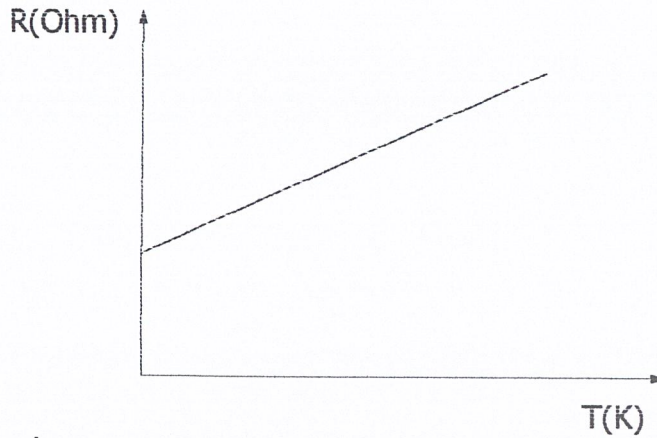
ชนกันจึงไม่เกิดพลังงานความร้อนขึ้นในตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ทฤษฎีที่อธิบายสภาพนำไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้าที่ยาวทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันก็คือทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) ยังคงมีการศึกษากันอยู่และพยายามนำมาอธิบายการเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวในสารประกอบเซรามิก

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการไหลของประจุไฟฟ้าเกิด “กระแสไฟฟ้า” และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอน (Electronic Conduction) วัสดุที่มีการนำไฟฟ้าในลักษณะนี้ที่ทุกอุณหภูมิเรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนั้นจะมีสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่ เช่น ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ หรือมีการสั่นของอะตอม ทำให้ผลึกไม่สมบูรณ์ มีสิ่งเจือปน (Impurity) อยู่ด้วยเสมอ สำหรับความต้านทานไฟฟ้าในตัวนำไฟฟ้านั้นเกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนและการสั่นของโครงผลึกดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งอยู่ในสถานะนำไฟฟ้าปกติ ดังนั้นโลหะทุกชนิดจะมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเสมอ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นค่าวัดปริมาณไฟฟ้าที่ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่ได้รับจากอิเล็กตรอน ทำให้ความต้านทานของวัสดุนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการรบกวนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ทำให้ความต้านทานสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลง ความต้านทานก็จะลดลงด้วย แต่ไม่ว่าอุณหภูมิจะลดลงเพียงใดก็ตาม การสั่นของโครงผลึก และสารเจือปนที่ปนอยู่ในโครงสร้างจะทำให้ความต้านทานไม่มีทางเป็นศูนย์ได้ดังในรูปที่ 2.2



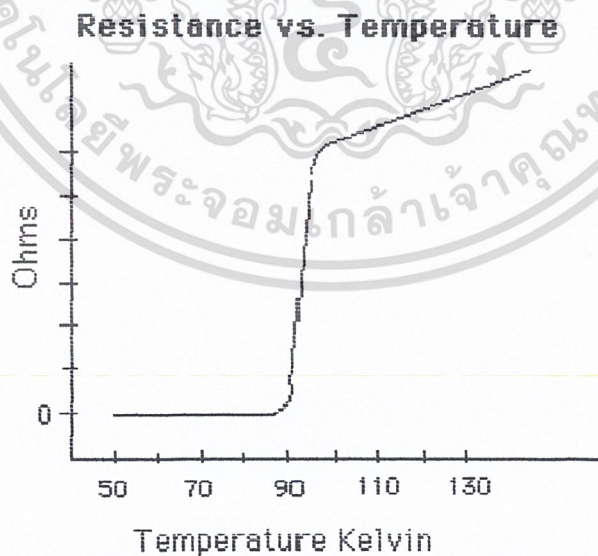
รูป 2.1 การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพนำไฟฟ้าปกติ (Normal State)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะ

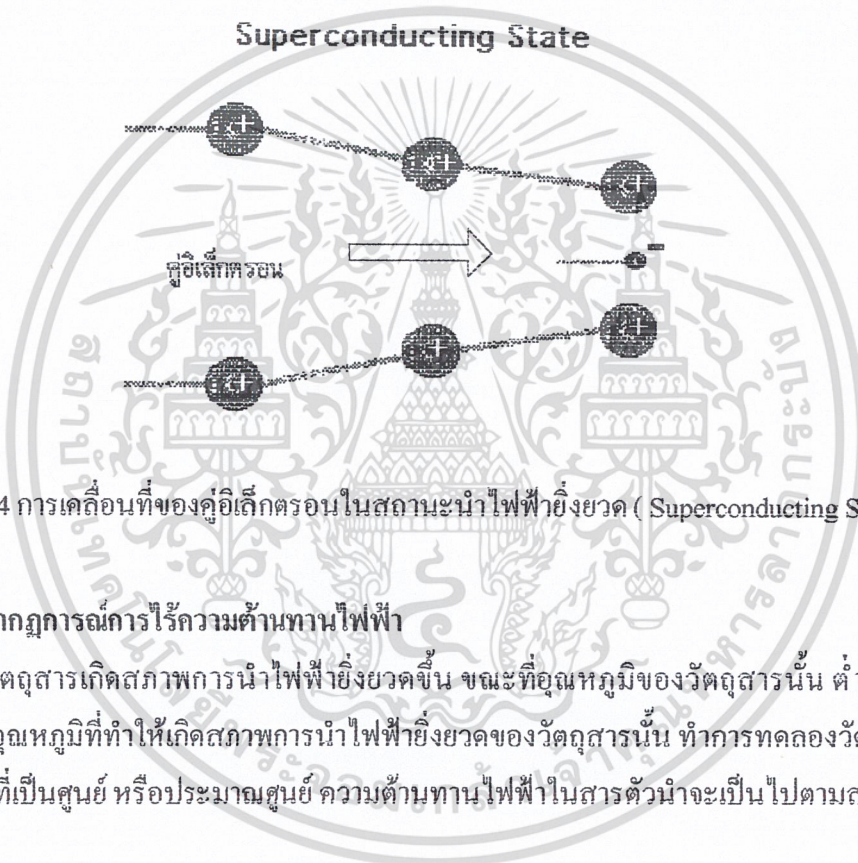
จากการที่ความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงการสั่นของโครงผลึกน้อยลงและอิเล็กตรอนมีการกระเจิงลดลงด้วย จำนวนการชนก็ลดน้อยลง ช่วงการชนจะยาวขึ้นจึงทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าลดน้อยลง และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงถึงจุดหนึ่ง ช่วงปลอดการชนจะยาวขึ้นจนแทบไม่ชนกันเลย ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้านี้มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ เมื่อวัตถุนั้นอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกрит ความต้านทานทางไฟฟ้าจะหายไปอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น (Superconducting State) เป็นสถานะที่อิเล็กตรอนตัวนำของโลหะอยู่ในลักษณะของคู่อิเล็กตรอนเป็นคู่ๆ โดยอิเล็กตรอนจะมีการเรียงตัวเป็นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้คู่อิเล็กตรอนจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เกิดความต้านทานทางไฟฟ้า ในการเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะ สารกึ่งตัวนำ และสารประกอบต่างๆ แต่ต้องอยู่ในอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconducting State)

2.1.2 ปรัชญาการไร้ความต้านทานไฟฟ้า

เมื่อวัสดุสารเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ขณะที่อุณหภูมิของวัสดุสารนั้น ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุสารนั้น ทำการทดลองวัดค่าความต้านทาน จะได้ค่าที่เป็นศูนย์ หรือประมาณศูนย์ ความต้านทานไฟฟ้าในสารตัวนำจะเป็นไปตามสมการ ที่ 2.1

$$\rho = m/ne^2 \tau_{(T)} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ = ความต้านทานทางไฟฟ้า

m = มวลของอิเล็กตรอน

n = ความหนาแน่นของจำนวนอนุภาค

e = ประจุไฟฟ้าของอนุภาค

ไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตร

$\tau_{(T)}$ = ช่วงเวลาปลอดการชนของอิเล็กตรอน

จากสมการ ค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เพราะเมื่ออุณหภูมิลดลงการสั่นของโครงผลึก ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิต่ำลง การกระเจิงของอิเล็กตรอนก็จะลดลงด้วย จำนวนอิเล็กตรอนชนกันน้อยลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เขียนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซอร์เขียนที่นั่นการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการชนก็จะยาวขึ้นค่าความต้านทานจึงน้อยลง อุณหภูมิยิ่งต่ำมากช่วงปลอดการชนก็จะยาวขึ้นแทบไม่ชนกันเลย ความต้านทานทางไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยิ่งนั้นค่าความต้านทานจะหายไปอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกрит

2.1.3 ปรางกูการณไมส์เนอร์

ในปี พ.ศ. 2476 ไมส์เนอร์ (W. Meissner) และ โอเชินเฟลด์ (R . Ochsenfeld) ได้ทดลองเกี่ยวกับสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสนามแม่เหล็กพบว่า ตัวนำในสภาพปกติจะยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปได้ แต่ถ้าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้าที่ยิ่งยวดแล้วจะผลักสนามแม่เหล็กออกไปจึงเรียกปรางกูการณนี้ว่า ปรางกูการณไมส์เนอร์ (Meissner effect)

จากผลการทดลองของไมส์เนอร์ แสดงว่า ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอา (diamagnetic) จากคุณสมบัติทางแม่เหล็กซึ่งมีสมการเป็น

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.2)$$

$$\vec{M} = \vec{H} \chi \quad (2.3)$$

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (2.4)$$

\vec{B}	แทนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า
\vec{H}	แทนความเข้มสนามแม่เหล็ก
\vec{M}	แทนสภาพแม่เหล็ก (Magnetization)
χ	แทนค่าสภาพอ่อนไหว (Susceptibility) ของแม่เหล็ก
μ_0 และ μ_r	แทนค่าความซาบซึบได้ (Permeability) ของสุญญากาศและค่าความซาบซึบได้สัมพัทธ์

สำหรับกรณีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สมการ (2.2) , (2.3) และ (2.4) จะเขียนได้เป็น

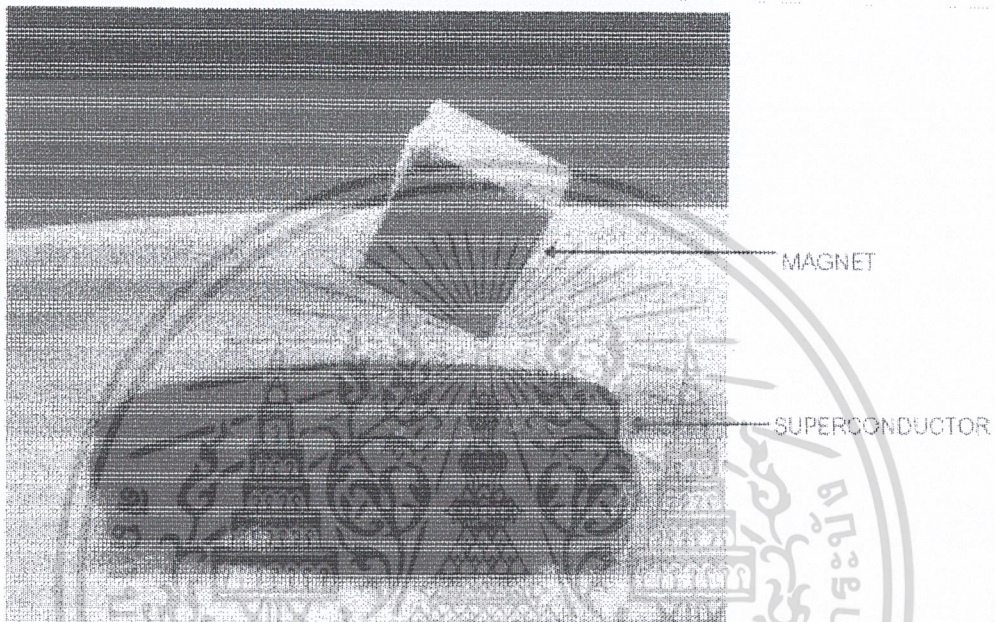
$$\vec{M} = - \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\chi = - 1 \quad (2.6)$$

$$\mu_r = 0 \quad (2.7)$$

จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แสดงอำนาจแม่เหล็กไดอานี้ จึงทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า – แม่เหล็ก แตกต่างไปจากตัวนำธรรมดา คือ พิจารณาวงแหวนตัวนำธรรมดาและวงแหวนตัวนำยิ่งยวดเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไฟฟ้ายิ่งยวด ขนาดเท่ากันวางในสนามแม่เหล็กภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่า เมื่อหยุคผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไป วงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาเองซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลวนในวงแหวน สำหรับตัวนำธรรมดา จะไม่ปรากฏสนามแม่เหล็กเลย



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์

2.1.4 อุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature)

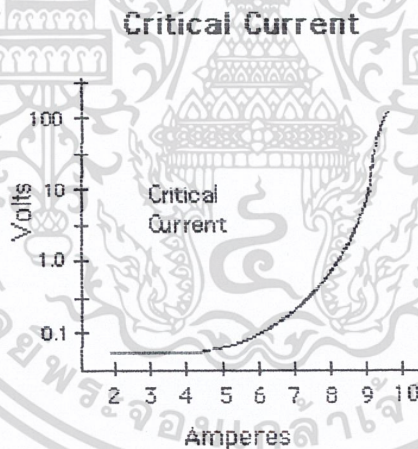
จากการที่ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความต้านทานลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤติ อุณหภูมิวิกฤตินี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะ ของสารแต่ละชนิดและมีค่าคงที่ เช่น โลหะที่มีความบริสุทธิ์นั้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่ำมากเมื่อเติมสารเจือทางแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยจะทำให้อุณหภูมิจึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก อุณหภูมิวิกฤตินี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ จะทำให้คุณสมบัติต่างๆดีขึ้นเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานและคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถยอมรับได้ และนำไปพิจารณาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้อีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อให้กระแสไหลผ่านมากเพียงพอ จนทำให้เกิดค่าแรงดันตกคร่อมขั้วสารหรือเกิดมีความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นนั้นเรียกรวมปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ค่ากระแสที่ผ่านนี้เรียกว่า กระแสวิกฤติ (Critical Current : I_c) เมื่อให้กระแสไหลผ่านน้อยกว่ากระแสวิกฤติจะไม่เกิดแรงดันตกคร่อมหรือความต้านทาน แต่เมื่อให้กระแสไหลมากกว่ากระแสวิกฤติจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม

สำหรับในการพิจารณาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งาน สามารถพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤติ (Critical Current Density : J_c) ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤติ คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤติกับพื้นที่หน้าตัดของขั้วสารที่กระแสไหลผ่าน พารามิเตอร์ตัวนี้มีความสำคัญอย่างมากเพราะในขั้วสารเดียวกันจะมีค่าความหนาแน่นกระแสวิกฤติเท่ากันหมดทุกจุด ดังนั้นในส่วนที่เชื่อมต่ออ่อนอย่างหลวมๆ จะยอมให้กระแสวิกฤติไหลได้น้อยที่สุด ถ้าให้กระแสไหลมากกว่าค่ากระแสวิกฤตินี้จะทำให้ขั้วสารตรงจุดนั้นแตก หรือแยกจากกัน จะเกิดความต้านทานทางไฟฟ้าหรือแรงดันตกคร่อมขั้วสารตรงจุดนั้นทันที



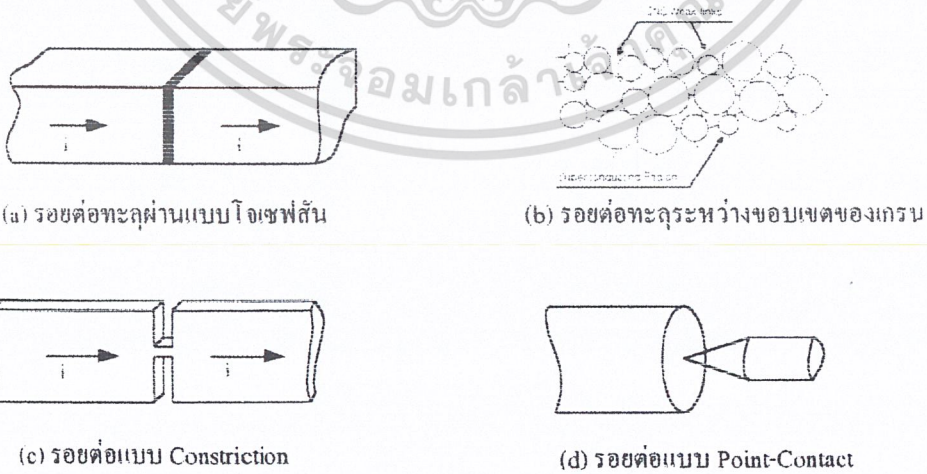
รูปที่ 2.6 กระแสวิกฤติ

2.1.6 ปรากฏการณ์รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Effect)

ในการศึกษาเรื่องการทะลุผ่านระหว่างโลหะ-โลหะนั้นจะต้องมีฉนวนหรือผนังกันบางๆ ซึ่งจะต้องมีความบางน้อยกว่า 10^7 เมตร อิเล็กตรอนนำธรรมดาจึงสามารถทะลุผ่านข้ามฉนวนไปได้เพราะโดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านฉนวนนี้ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยกว่าที่จะข้ามกำแพงศักย์ไปได้ แต่ถ้าฉนวนนั้นบางมากๆ อิเล็กตรอนก็สามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปได้ ปรากฏการณ์ทะลุผ่านนี้เป็นปรากฏการณ์เชิงกลทางควอนตัม (Quantum Mechanical Phenomenon) จากการศึกษาการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนเดี่ยวๆ นี้เป็นการศึกษาการทะลุผ่านแผ่นฟิล์มโลหะสองแผ่นซึ่งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังกันออกไซด์อยู่ ซึ่งผนังกันออกไซด์นี้มีอยู่หลายชนิดที่ใช้ในการศึกษา ส่วนมากแล้วในการทะลุผ่านในแต่ละด้านของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีการ Overlap กัน แต่ในความเป็นจริงแล้วผนังกันออกไซด์จะต้องเกิดการ Overlap กันขึ้นอยู่แล้ว ผลจากการเกิด Overlap นี้จะเกิดปรากฏการณ์ใหม่ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์รอยต่อโจเซฟสัน (Josephson Effect) ทำให้เกิดมีกระแสตรงชุปเปอร์ไหลผ่านแผ่นผนังกันนี้มีพฤติกรรมเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคติงค์ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเกิดมีแรงดันตกคร่อมแล้วจะมี Phase Slip เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองด้าน และ Phase Slip สามารถชิงโครนส์กับสนามไฟฟ้าแบบสลับที่กระทำกับรอยต่อแบบวิคติงค์นี้ ผนังกันระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบวิคติงค์นี้ไม่ได้มีเฉพาะแต่ผนังกันที่ สร้างจากออกไซด์เท่านั้น โดยหลักการของปรากฏการณ์โจเซฟสันแล้วสามารถเกิดปรากฏการณ์ ได้จากการที่มีการเชื่อมต่อ (Coupling) อย่างแข็งแรงเพียงพอสำหรับเฟสตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในแต่ละด้านและอีกกรณีเกิดจากการเชื่อมต่อซึ่งอาจจะมีลักษณะหลวมๆ เพียงพอสำหรับสนามไฟฟ้ากระทำได้ในลักษณะวิคติงค์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้สามารถแบ่งตามชนิดต่างๆ ดังนี้คือ

1. ผนังกันออกไซด์ระหว่างแผ่นฟิล์มระหว่างฟิล์มที่ผ่านการ Evaporate ซึ่งในกระบวนการสร้างความบางให้เพียงพอสำหรับการให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านนั้นสร้างได้ยากมาก
2. รอยต่อโจเซฟสันระหว่างขอบเขตของเกรน (Intergrain Josephson Junction) หรือ SNS Weak Link ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซอร์รามิก
3. แผ่นฟิล์มหรือ Bulk ที่มีลักษณะรูปแบบเป็น Constriction หรือ Microbridge
4. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีลักษณะ Bulk 2 ชั้นที่มีการเชื่อมกันแบบ Point contact ลักษณะของผิวจะเกิดการออกซิไดส์และลักษณะของ Point เกิดจากอัดของชั้น Bulk ส่วนมากแล้ว Point Contact จะต้องสร้างใน Cryostat ที่สามารถกำหนดความดันได้



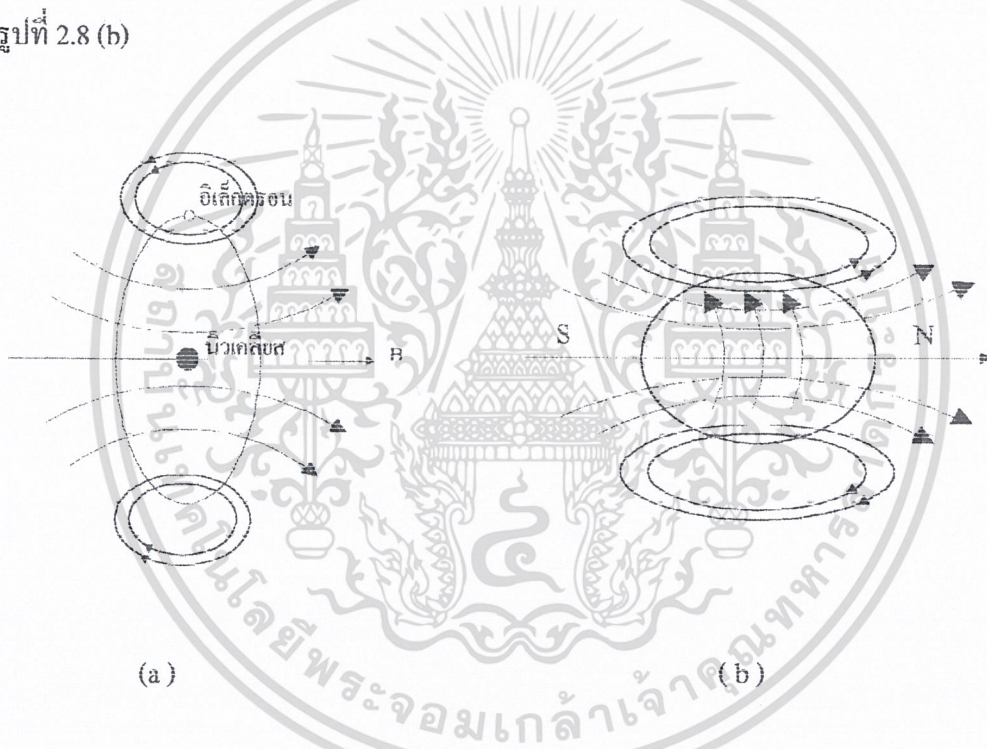
รูปที่ 2.7 รูปแบบต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวิคติงค์ (Weakly-Linked Superconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.2.1 คุณสมบัติทางแม่เหล็กทั่วไป

สมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารนั้นเกิดจากอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็กเป็นไปได้ 2 กรณี คือ กรณีแรกเกิดจากอิเล็กตรอนหมุนวนรอบนิวเคลียสในอะตอม การหมุนวนนั้นก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะคล้ายกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำที่ขดเป็นวงกลม ทิศทางของกระแสไฟฟ้านั้นตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.8 (a) กรณีที่สองเกิดจากสมบัติประตัวของอิเล็กตรอน กล่าวคือ อิเล็กตรอนประพฤติกรรมคล้ายกับว่าเป็นแท่งแม่เหล็กแท่งเล็กๆ ส่งสนามแม่เหล็กออกโดยรอบ อาจถือเสมือนหนึ่งว่าอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นกลุ่มประจุไฟฟ้าลบที่หมุนรอบตัวเอง การหมุนของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า อิเล็กตรอนสปิน (Electron Spin) นี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดังกล่าวดังในรูปที่ 2.8 (b)



รูปที่ 2.8 (a) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอะตอมก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก

(b) อิเล็กตรอนสปินเป็นเหตุให้เกิดสนามแม่เหล็กได้อีกทางหนึ่ง

การเกิดสนามแม่เหล็กจากทั้งสองกรณีนั้น ถ้าเป็นแท่งแม่เหล็กสนามแม่เหล็กจะเกิดจากอิเล็กตรอนสปินมากกว่าที่จะเกิดจากการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียส แต่ถ้าไม่ใช่วัสดุที่จะมาทำแท่งแม่เหล็กได้แล้ว การเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงกลม จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากกว่าสารต่างๆ โดยทั่วไปแล้วนั้น ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา การที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อมีการหมุนวนเป็นวงกลมรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนตัวหนึ่ง ก็จะมีอิเล็กตรอนอีกตัวหมุนวนในทิศตรงข้าม สนามแม่เหล็กก็หักล้างกันไปหมด ในทำนองเดียวกันเมื่อมีอิเล็กตรอนมีสปินในทิศหนึ่งก็จะมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนอีกตัวมีสปินในทิศตรงกันข้ามหักล้างกันไปอีก การหักล้างเช่นนี้ทำให้สารนั้นไม่เป็นแม่เหล็ก สารที่เป็นโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก โคบอลต์ และ นิกเกิล ซึ่งโลหะสารชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า สารแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic Materials) และสารโลหะที่มีชื่อว่าแมกนีไทดต์ (Magnetite) ซึ่งเรียกว่า สารแม่เหล็กเฟอร์ริ (Ferrimagnetic Materials) สารดังกล่าวนี้มีการเรียงตัวของอิเล็กตรอนซึ่งมีสปินในทิศทางหนึ่งมากกว่าในอีกทิศทางหนึ่ง ถ้าเราพิจารณาแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่งแท่งใด แนวเหนือใต้ของแท่ง ก็คือ แนวการหมุนของอิเล็กตรอนในเนื้อสารแม่เหล็กนั้นดังในรูปที่ 2.9 ถ้ามีความเข้มข้นแม่เหล็กสูง ก็แสดงว่ามีจำนวนอิเล็กตรอนที่หมุนไปในทิศทางเดียวกันมาก



รูปที่ 2.9 ลักษณะอิเล็กตรอนสปินของอิเล็กตรอนหลายตัว

2.2.2 ความเป็นแม่เหล็ก

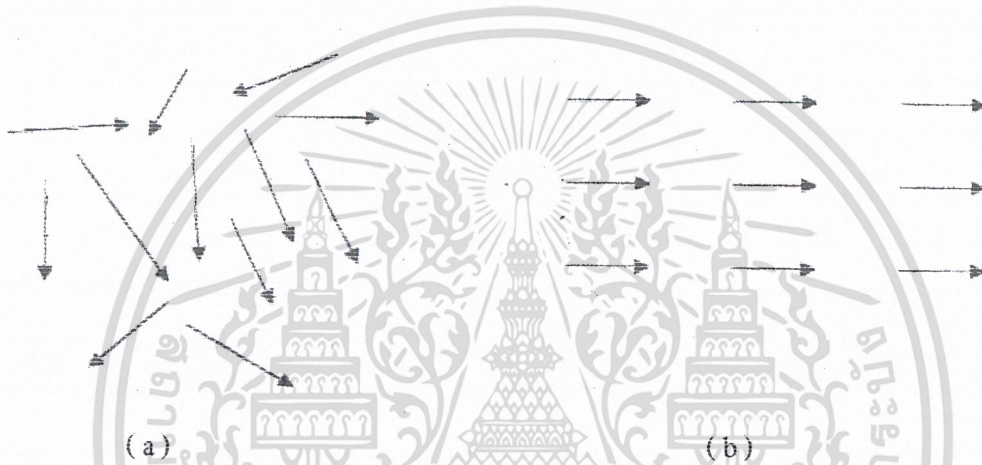
อะตอมจะแสดงสมบัติว่ามีโมเมนต์ขั้วคู่แม่เหล็กหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดอิเล็กตรอนในวงโคจรต่างๆ ของอะตอมนั้นๆ ส่วน โมเลกุลส่วนมากมักไม่อยู่ในลักษณะก๊อกลวมจึงมักจะมีโมเมนต์ขั้วคู่แสดงออก ตัวอย่างเช่น โมเลกุลประเภทที่สองอะตอมเกาะกัน เช่น พวกก๊าซต่างๆ จะมีโมเมนต์ขั้วคู่ของแม่เหล็กตามแนวแกนของโมเลกุลนั้น สารที่อยู่ในลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ยกเว้นสารแม่เหล็กเฟอร์โร จะไม่แสดงโมเมนต์ขั้วแม่เหล็ก เนื่องจากโมเลกุลของมันเรียงตัวมีทิศทางอย่างสุ่ม แต่ถ้าหากว่ามีสนามแม่เหล็กภายนอกมาอยู่ในบริเวณสารนั้น ทำให้การโคจรของอิเล็กตรอนมีทิศทางเปลี่ยนไป อำนาจแม่เหล็กนั้นจะเกิดขึ้นมาในสารก้อนนั้น ได้การที่ทำให้สารหนึ่งสารใดแสดงความเป็นแม่เหล็กออกมา โดยใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกนี้ เรียกว่า การทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็ก และการที่อะตอมหรือโมเลกุลมีทิศโมเมนต์ขั้วแม่เหล็กในทิศทางหนึ่งทิศใดมากกว่าทิศอื่นนั้น เรียกว่า โพลาริเซชัน (Magnetic Polarization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ชนิดของความเป็นแม่เหล็กของสาร

2.2.3.1 อำนาจแม่เหล็กพารา

การแสดงอำนาจแม่เหล็กพารา (Paramagnetism) หมายถึง การที่สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ อะตอมเกิดแรงคู่ให้หัน ไปในทิศทางที่เรียงตัวกันตามสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น สมบัติที่สำคัญของ ความเป็นแม่เหล็กแบบนี้ ก็คือ ค่าความเป็นแม่เหล็กของสารเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก การเป็นสัดส่วนกลับกันกับอุณหภูมิ ตัวอย่างของสารแม่เหล็กชนิดนี้คือ สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กพารา การเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อำนาจแม่เหล็กพารา

(a) โมเมนต์ขั้วคู่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ

(b) สนามแม่เหล็กภายนอกทำให้ โมเมนต์ขั้วคู่มาเรียงตัวกัน

2.2.3.2 อำนาจแม่เหล็กไดอา

การแสดงอำนาจแม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) หมายถึง การที่สารแม่เหล็กมีการต่อต้านกับ สนามแม่เหล็กภายนอกสารแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่าสารแม่เหล็กไดอา (Diamagnetic Substances) ตัวอย่างของสารแม่เหล็กชนิดนี้ คือ บิสมัท สาเหตุแห่งการที่สารแม่เหล็กไดอาต่อต้านสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น อธิบายได้ด้วยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารนั้น และ ถ้านำสารประเภทสารแม่เหล็กไดอาวางในสนามแม่เหล็ก (B) ก่อให้เกิดแรงผลักดันระหว่างสนามแม่เหล็กของสารกับสนามแม่เหล็กภายนอก สรุปได้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นตัวแทนนำให้สารแม่เหล็กเหมือนกัน ซึ่งจะผลักดัน

2.2.3.3 อำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร

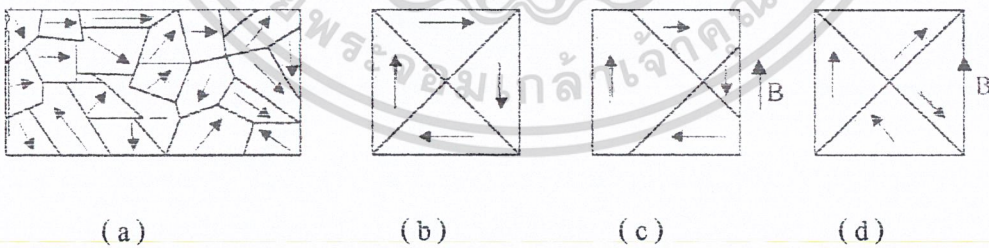
การแสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) อะตอมของสารแม่เหล็กเฟอร์โรจะมีการ จัด โมเมนต์ขั้วคู่เหนี่ยวนำซึ่งกันและกันให้มีทิศทางไปทางเดียวกัน ภายใต้แรงกระทำซึ่งกันและกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติที่เด่นชัดของสารแม่เหล็กเฟอร์โร ก็คือ ความเป็นแม่เหล็กของสารไม่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและสารอาจแสดงสมบัติทางแม่เหล็กได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแม่เหล็ก สารแม่เหล็กเฟอร์โรมีอยู่ 5 ธาตุ ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล กาโดลิเนียม และดิสโพรเซียม สารทั้ง 5 นี้จะคงสภาพเป็นสารแม่เหล็กเฟอร์โรที่อุณหภูมิยังไม่เกินค่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเปลี่ยนไปเป็นสารแม่เหล็กพาราทันที่สมบัตินี้จะเกิดได้ แม้ว่าอะตอมของธาตุทั้ง 5 นี้อยู่ในโครงสร้างผลึก ซึ่งไม่ใช่มีแค่ธาตุทั้ง 5 นี้อย่างเดียว

ตารางที่ 2.1 สารแม่เหล็กเฟอร์โร

ธาตุ	เลขอะตอม(Z)	น้ำหนักอะตอม
Fe	26	55.85
Co	27	58.94
Ni	28	58.71
Gd	64	157.26
Dy	66	162.51

ในสารแม่เหล็กเฟอร์โรนั้น อิเล็กตรอน 2 ตัวที่อยู่ใกล้ๆกัน จะมีสปินชี้ไปในทิศทางขนานกัน ก่อให้เกิดปริมาตรเล็กๆ ขนาด $10^6 - 10^{12}$ ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีการเรียงของแนวการหมุนของอิเล็กตรอนไปในทิศทางขนานกัน เรียกว่า โดเมน (Domain) โดเมนหนึ่งๆ มีอะตอมประมาณ $10^{17} - 10^{21}$ อะตอม ทิศทางความเป็นแม่เหล็กของ โดเมนขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของผลึกสาร ลักษณะ โดเมนของสารแม่เหล็กเฟอร์โร แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



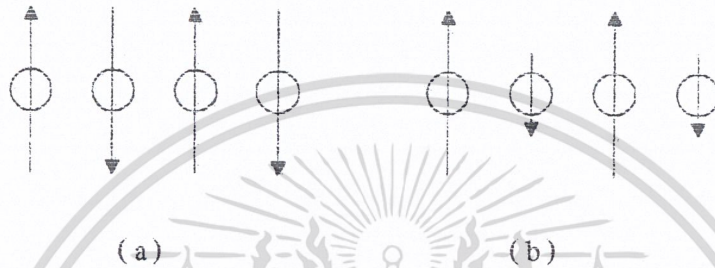
รูปที่ 2.11 ลักษณะ โดเมนในสารแม่เหล็กเฟอร์โร

- ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก โดเมนจะเรียงสับสน โมเมนต์ขั้วคู่จะมีทิศทางต่างๆกันไป
 - ส่วนหนึ่งของโดเมนขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก
 - เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก โดเมนจะเพิ่มส่วนหนึ่ง ลดส่วนหนึ่ง
 - ขณะมีสนามแม่เหล็ก โดเมนจะเรียงทิศใหม่
- ทั้ง (c) และ (d) สารจะมีความเป็นแม่เหล็กขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.4 อำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetism) หมายถึงสารที่มีการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนหลายๆตัวขนานกัน แต่มีทิศทางกลับทิศกัน ค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของสารรวมเป็นศูนย์และมีค่าความเป็นแม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ สารเหล่านี้ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ และแมงกานีส ซึ่งมีลักษณะทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (a) แสดงการเรียงตัวของสารแอนติเฟอร์โร (b) แสดงการเรียงตัวของสารเฟอร์รี

สารที่แสดงอำนาจแม่เหล็กเฟอร์รี (Ferrimagnetism) หมายถึง สารที่มีเวกเตอร์ของโมเมนต์ขั้วคู่ขนานกัน ในทิศทางตรงกันข้ามกันมีขนาดไม่เท่ากัน เป็นผลให้มีอำนาจแม่เหล็กเหลืออยู่สารเหล่านี้ได้แก่ เฟอร์ไรต์ ($XOFe_2O_3$) โดยที่ X คือ Fe Mn Co Ni Cu Mg Zn และ Cd ตัวหนึ่งตัวใดก็ได้ และถ้า X เป็น Fe สารนี้คือ Fe_3O_4 หรือแมกนีไตต์นั่นเอง

2.2.4 แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic Magnetics)

อิเล็กตรอนทุกตัวภายในอะตอมจะมี โมเมนต์แม่เหล็ก โดยค่าของ โมเมนต์แม่เหล็กนี้เรียกว่า “Bohr Magneton” ซึ่งเท่ากับ 9.27×10^{-24} แอมแปร์-ตารางเมตร โลหะทรานซิชันได้แก่เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และแกโดลิเนียม ภายในอะตอมมีอิเล็กตรอนสปีนอย่างไม่สมดุล ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กรวมไม่เท่ากับศูนย์จึงสามารถเกิดสถานะแม่เหล็กได้ สารประกอบเซรามิกถ้าภายใน โครงสร้างประกอบด้วย ไอออนของโลหะที่กล่าวมาข้างต้น มีการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กได้เอง แม่เหล็กเซรามิกจะมีสถานะ เฟอร์รีแมกเนติก ประกอบด้วยไอออนของโลหะและอโลหะ ซึ่งมีขนาดของไดโพลโมเมนต์แม่เหล็กไม่เท่ากันและมีทิศทางกลับกันแต่มีการปรับแนวให้ขนานกันได้

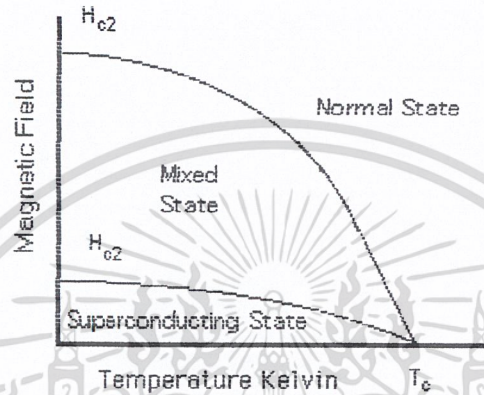
2.2.5 สนามแม่เหล็กวิกฤติ (Critical Magnetic Field : H_c)

จากการผ่านสนามแม่เหล็กไปยังตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า สนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้กลายเป็นสภาพปกติ (Normal State) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติน้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้พอดีนั้นจะเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤติ (Critical Magnetic Field : H_c) และพบว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตินี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้เองค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจึงถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ยาว คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะต้องไม่ทำให้สนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมินั้นๆ

Fig. 8



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ

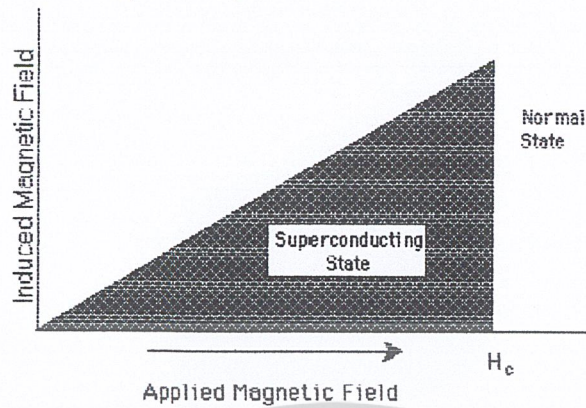
จากรูปที่ 2.13 ถ้าโลหะมีค่าสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิที่สอดคล้องกันอยู่ภายใต้เส้นแผนภาพเฟส (Phase Diagram) โลหะนั้นยังคงสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอยู่ได้ แต่ถ้าต้องการให้กลับไปสู่สภาพปกติก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กหรือเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มทั้งสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิพร้อมๆกันก็ได้

2.3 ประเภทของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวประเภทที่ 1 และ 2

ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวมีทั้งประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าต่ำและที่มีค่าสูงประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าต่ำมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก ส่วนประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าสูงมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงไม่มาก ดังนั้น ถ้ามองด้านความแข็งแรงวัสดุอาจแบ่งออกเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบอ่อนและตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแบบแข็งแต่ในปัจจุบันประเภทของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวมักแบ่งตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็น 2 ประเภท และมีชื่อเรียกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวประเภทที่ 1 และตัวนำไฟฟ้าที่ยาวประเภทที่ 2 (เทียบได้กับประเภทอ่อนและประเภทแข็งตามลำดับ) เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกให้กับตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแล้วตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะมีลักษณะการเกิดของเส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้าที่ยาวทั้งสองประเภทดังในรูปที่ 2.14

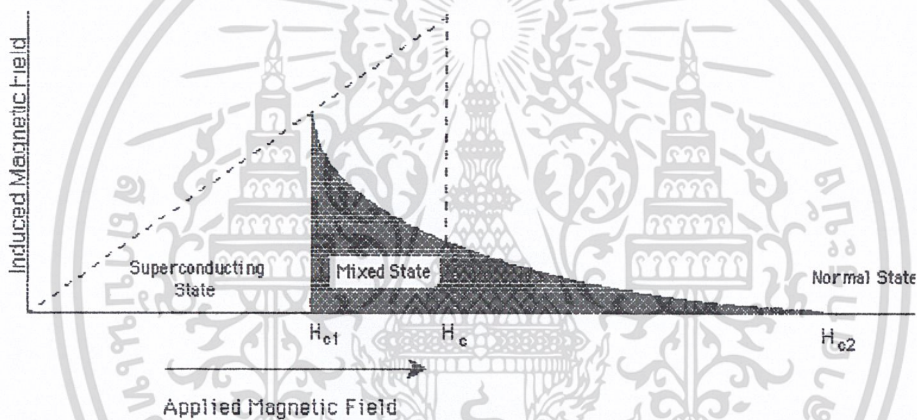
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type I Superconductor



(a) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1

Type II Superconductor



(b) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และ Induce Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (a) ประเภทที่ 1 (b) ประเภทที่ 2

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารเจือปนและวิธีการขึ้นรูป กราฟการเป็นแม่เหล็กจะมีรูปเป็นฮิสเทอริซิส(Hysteresis) การเพิ่มสารเจือปนหรือวิธีการขึ้นรูปอาจทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กลายเป็นประเภทที่ 2 ได้ และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอุดมคติที่กล่าวถึงส่วนมากมักหมายถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สำหรับปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก็คือ ค่าความยาวความลึกของการทะลุผ่านของสนามแม่เหล็กและความยาวโคฮีเรนซ์

การพิจารณารูปที่ 2.14 โดยการป้อนความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าสู่วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้ คือ

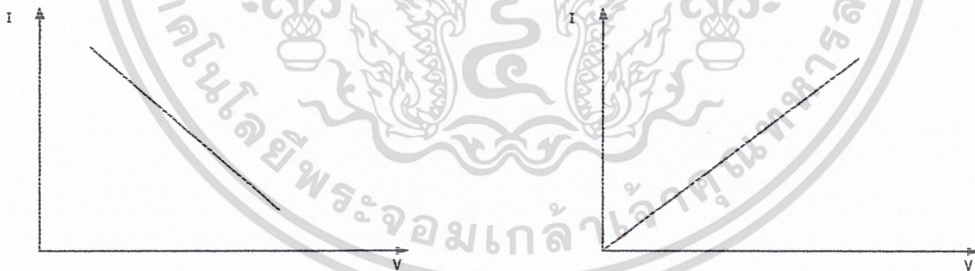
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 คราบไคที่ค่าสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ป้อนให้ยังมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤติของวัสดุนั้น จะทำให้เนื้อวัสดุไม่มีส่วนที่เป็นตัวนำปกติเลยวัสดุจึงแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กภายในวัสดุมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าป้อนค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติ วัสดุจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าปกติ และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีค่าเท่ากับ $\mu_0 H_a$

ถ้าวัสดุนี้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 แล้วทำการป้อนค่าสนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติขอบล่าง (Lower Critical Field : H_{c1}) แต่ยังมีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤติขอบบน (Upper Critical Field : H_{c2}) นั่นคือ $H_{c1} < H < H_{c2}$ ดังนั้นจึงทำให้เนื้อภายในวัสดุมีทั้งตัวนำไฟฟ้าปกติและตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดผสมกันอยู่ และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็กวิกฤติขอบบนแล้วปริมาณของตัวนำไฟฟ้าปกติก็จะเพิ่มขึ้นและวัสดุจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าปกติทั้งหมด

2.4 ความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance)

ลักษณะของความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นว่าขณะที่แรงดันตกคร่อมมีค่าลดลง กระแสจะไหลเพิ่มขึ้น แต่ถ้าแรงดันตกคร่อมมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสจะไหลลดลง



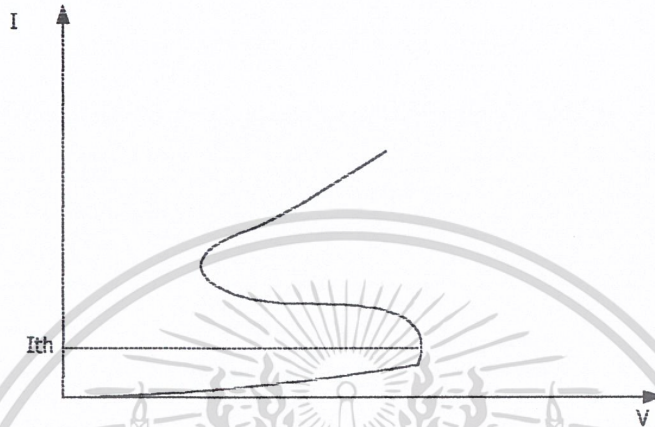
รูปที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่าง

(a) ชนิดที่เป็นความต้านทานเชิงลบ (b) ชนิดที่ไม่มีควมต้านทานเชิงลบ

2.4.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current control negative resistance)

ความต้านเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายกับตัวอักษร S ดังรูปที่ 2.16 ความต้านทานเชิง

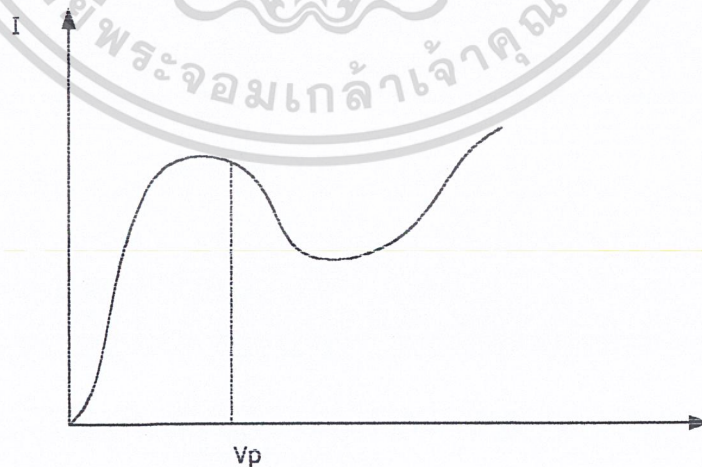
ลบแบบ S นี้ สามารถเกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤติ I_{TH} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current Controlled Negative Resistance (VCNR)



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

2.4.2 ความต้านทานเชิงลบชนิด N (Voltage controlled negative resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับตัวอักษรตัว N ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งความต้านทานเชิงลบนี้เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) จึงเรียกว่าความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage controlled negative resistance (VCNA) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode เป็นต้น



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

ในการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (GBCO) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว อีกทั้งกระบวนการสร้างก็ไม่ซับซ้อนมากนัก สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อุณหภูมิในการเผาที่ไม่สูงมากนัก และสารประกอบที่ใช้ก็ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อร่างกายขณะทำการสร้าง โดยในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง และผลการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงครั้งนี้เราจะทำการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (GBCO) แต่ในที่นี้จะเน้นในผลการทดลองของ GBCO โดยสารเคมีในการเตรียมจะประกอบด้วยอิตเทียมออกไซด์ (Y_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มีมวลโมเลกุล 225.81 แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มีมวลโมเลกุล 197.35 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มีมวลโมเลกุล 79.54 และ แกลโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% มีมวลโมเลกุล 362.517

3.1.2 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

นำสารเคมีในหัวข้อที่ 3.1.1 ได้แก่ แกลโดลิเนียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และ คอปเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นนำสารประกอบออกไซด์ทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $Gd : Ba : Cu$ ในอัตราส่วน 1 : 2 : 3 นำมาบดเข้ากัน โดยสังเกตจากสีของผงสารต้องเป็นสีเดียวกัน (สีเทาออกคล้ำๆ)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเผา

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ GBCO จะใช้ปฏิกิริยาของแข็ง ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นในกระบวนการสร้างนี้ต้องมีอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่สารพร้อมกับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการ อุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

3.1.3.1 เตาเผา (Furnance)

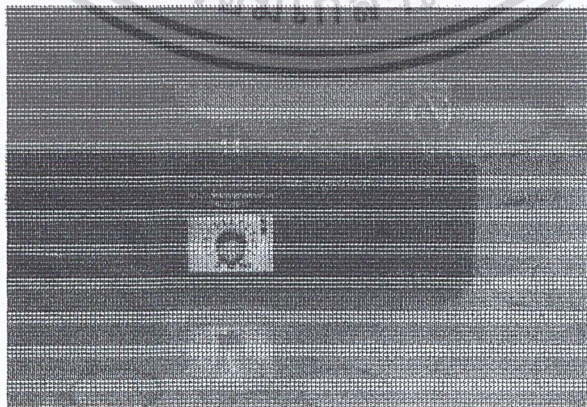
เป็นเตาเผาอุณหภูมิสูง (1050 องศาเซลเซียส) เตามีลักษณะเป็นทรงกระบอกประกอบด้วยท่อเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบขดลวดที่ใช้ไฟฟ้า 220 โวลต์ ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เตาเผาตัวนำไฟฟ้าขดอุณหภูมิสูงถึง 1050 องศาเซลเซียส

3.1.3.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

ใช้ชุดควบคุม Electronic Temperature Controller ซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 - 1000 องศาเซลเซียส เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้คงที่ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จากตัวควบคุมไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัดต่อไฟเลี้ยงของขดลวดความร้อนของเตาเผาทำให้เตาเผาที่มีความผิดพลาดของอุณหภูมิประมาณไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส ชุดควบคุมอุณหภูมิดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิเตาเผาความร้อนสูง 1050 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 อุปกรณ์การเตรียมสาร

จากรูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ในการเตรียมสาร ได้แก่ เครื่องชั่งสองแขนและชุดอุปกรณ์ครกบดสาร ถ้วยเผาทนความร้อน แผ่นอะลูมินา ช้อนตักสาร กระดาษพาราฟิน ปีกเกอร์ หลอด Capillary และแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์ในการเตรียมสาร

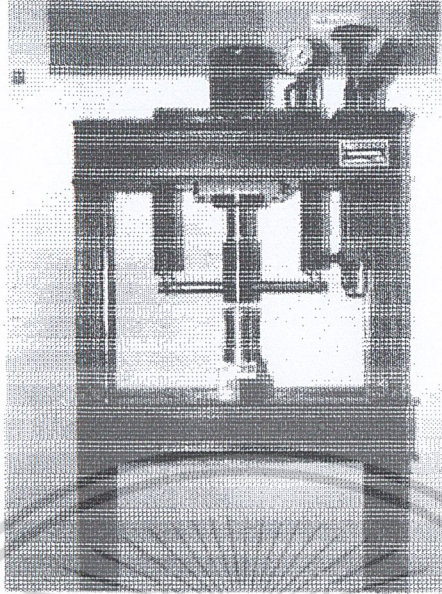
3.1.5 อุปกรณ์ในการขึ้นรูปสาร

ในการอัดจะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแรง 10 ตัน มีมอเตอร์เชื่อมความดันของค่าแรงอัดได้ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ดังในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ได้แก่ ชุดตัวเบ้าอัดที่ได้ออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับหัวอัดแรง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เลื่อยเหล็กและฉลุ ชุดตะไบ พู่กัน ถูมือ และที่ปิดจมูกกันฝุ่น



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปสาร

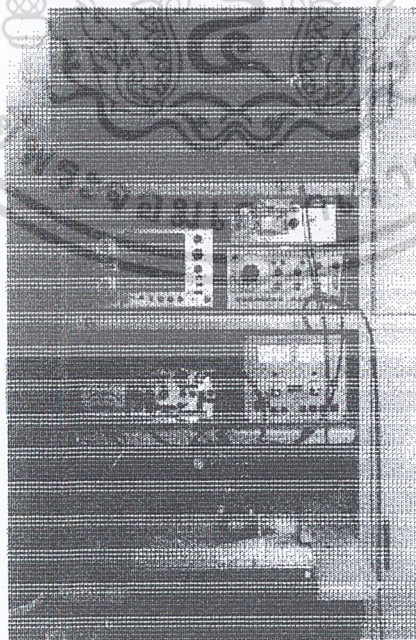
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องอัลตราโซนิกแรงอัดสูงสุด 10 ตัน

3.1.6 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

สำหรับชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดกระแส Nano Voltmeter เครื่องบันทึก 2 แกน (X-Y Recorder) และ Probe วัดชิ้นสารที่มีขั้ว 11 ขั้ว และคีมคีบสายไฟต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

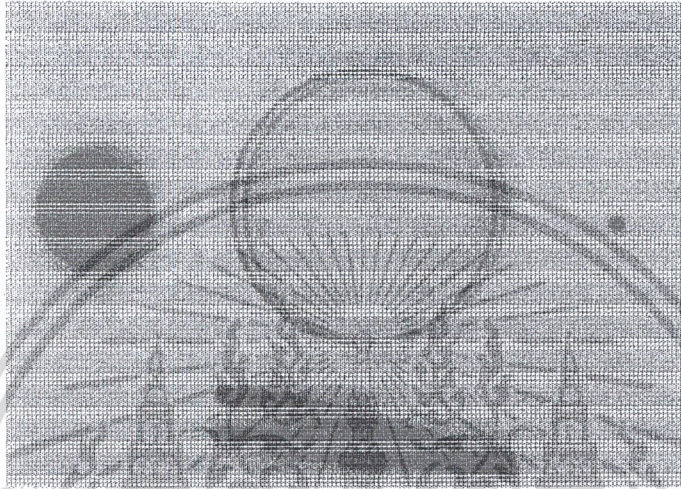


รูปที่ 3.6 Probe วัดชิ้นสารและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 ชุดวัดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

สำหรับชุดวัดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์จะประกอบด้วย แม่เหล็กถาวรความเข้มสูงชนิด Sm-Co คีมจับพลาสติก งานแก้วใส ไนโตรเจนเหลว และไม้บรรทัดพลาสติก รูปที่ 3.7 แสดงชุดวัดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

3.1.8 ชุดบัตรกรี้อัลตราโซนิก

ในการบัตรกรีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทเซรามิกนี้ต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็น โอห์มมิก ประกอบด้วย ตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียมและชุดบัตรกรีอัลตราโซนิก



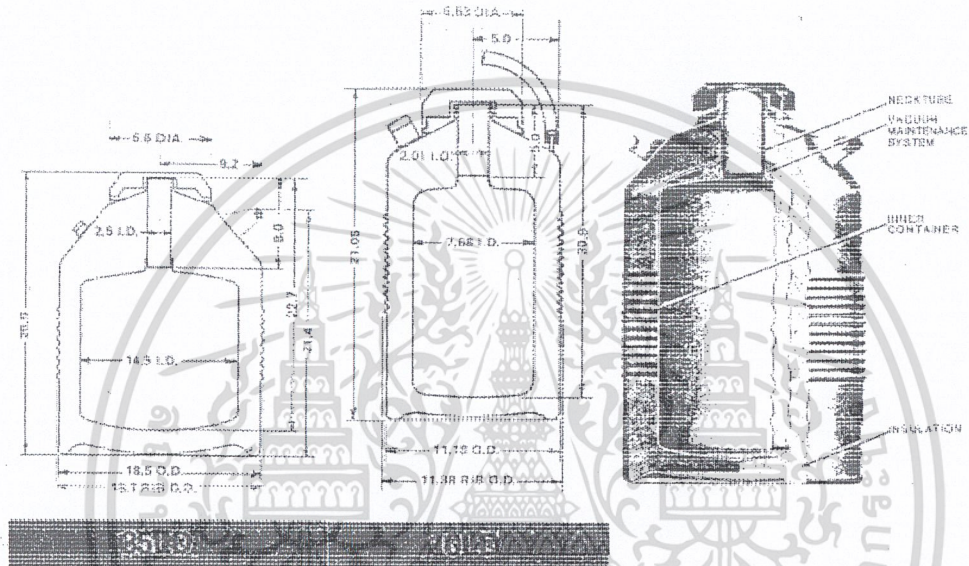
รูปที่ 3.8 ชุดบัตรกรีอัลตราโซนิกและตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 ถังเก็บไนโตรเจนเหลวขนาด 35 ลิตร และ 10 ลิตร

เป็นถังของบริษัท Taylor Wharton ประเทศสหรัฐอเมริกา สั่งซื้อผ่านทางบริษัท TIG ประเทศไทย ถังนำมาใช้มี 2 ขนาด คือ

1. รุ่น 10LD เป็นถังขนาดความจุ 10 ลิตร
2. รุ่น 35LD เป็นถังขนาดความจุ 35 ลิตร



รูปที่ 3.9 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว

3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ และ $Yb_2Cu_3O_{7-x}$

กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ สามารถเตรียมขึ้นได้จากสารประกอบแกดโดลิเนียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนตและคอปเปอร์ออกไซด์ มาบดผสมกันให้มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุดในกรณีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป และสามารถสร้างเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่เกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 90 เคลวิน ซึ่งกระบวนการสร้างนี้เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การคำนวณหาน้ำหนักสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง ($GdBa_2Cu_3O_{7-x}$)

ธาตุที่ใช้ในกระบวนการสร้าง คือ แกลดโดลิเนียม แบเรียม และทองแดง ธาตุเหล่านี้มาจากสารประกอบ ดังนี้ แกลดโดลิเนียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ สารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99%

ปริมาณที่ใช้ในการสร้างแต่ละครั้งจะขึ้นกับ อัตราส่วนของธาตุที่สำคัญคือ แกลดโดลิเนียม แบเรียม และทองแดง ถ้าต้องการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ เราต้องใช้ อัตราส่วนของธาตุ $Gd : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$ สารประกอบที่ใช้คือ

1. แกลดโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3)
2. แบเรียมออกไซด์ ($BaCO_3$)
3. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

($Gd = 157.26$, $Ba = 137.34$, $Cu = 63.54$, $C = 12$, $O = 15.9$)

Gd_2O_3	1 โมลหนัก	=	$(157.26 \times 2) + (15.9 \times 3)$	=	362.22	กรัม
$BaCO_3$	1 โมลหนัก	=	$137.347 + 12 + (15.9 \times 3)$	=	197.04	กรัม
CuO	1 โมลหนัก	=	$63.54 + 15.9$	=	79.44	กรัม

Gd_2O_3 1 โมล โมเลกุล มี $Gd = 2$ โมลอะตอม จึงต้องใช้ $Gd_2O_3 = 157.26 / 2 = 78.63$ กรัม

$BaCO_3$ 1 โมล โมเลกุล มี $Ba = 1$ โมลอะตอม จึงต้องใช้ $BaCO_3 = 197.04 \times 2 = 394.08$ กรัม

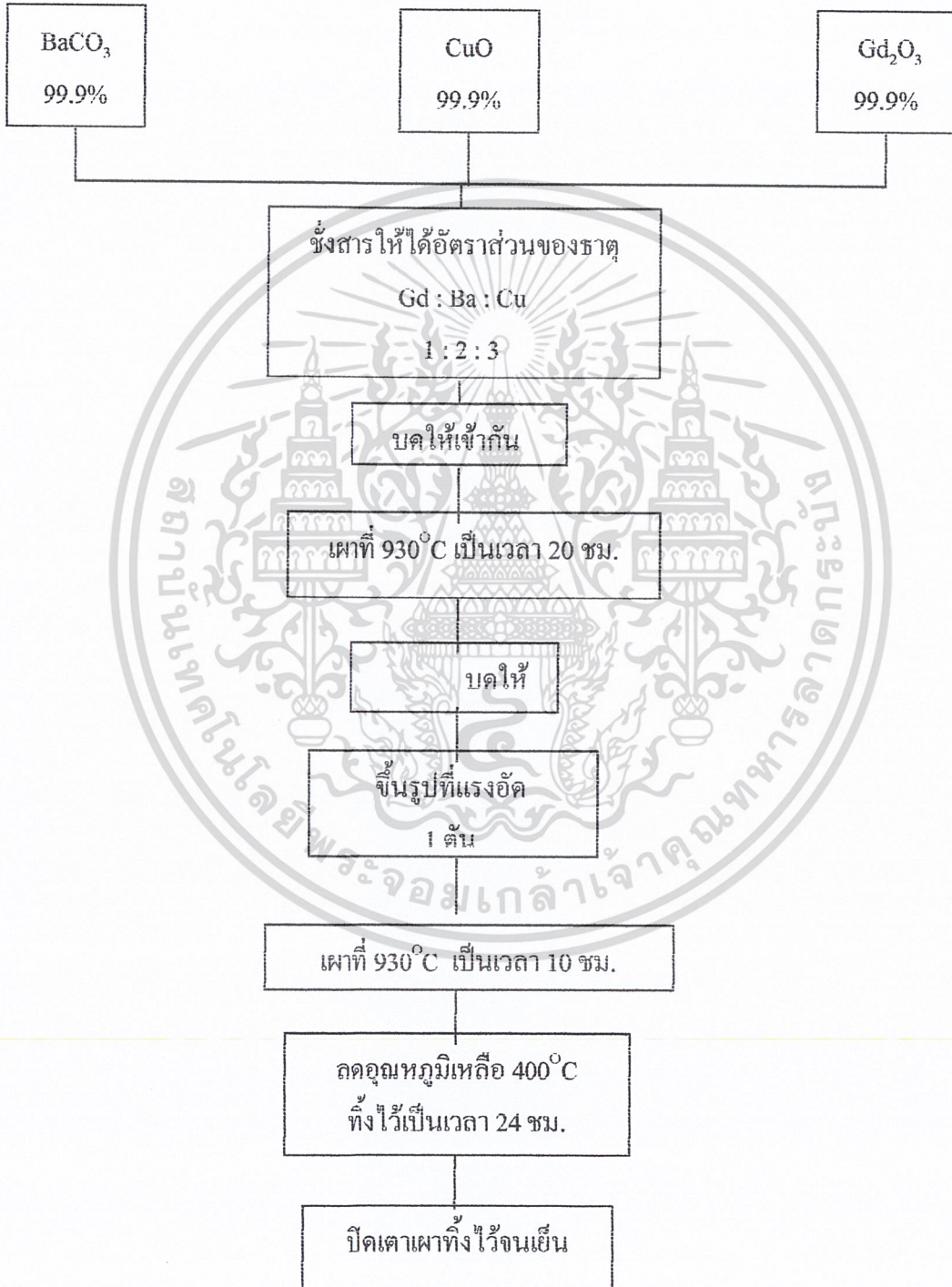
CuO 1 โมล โมเลกุล มี $Cu = 1$ โมลอะตอม จึงต้องใช้ $CuO = 79.44 \times 3 = 238.32$ กรัม

3.2.2 วิธีการทดลอง ($GdBa_2Cu_3O_{7-x}$)

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $Gd : Ba : Cu$ เป็น $1 : 2 : 3$
2. บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ในเวลาการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่เผามาเขี่ยส่วนสีเขียวออก จากนั้นนำมาบดละเอียด แล้วไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน ให้เป็นเม็ดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.
5. นำเม็ดสารมาวางบนแผ่นอะลูมินา แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 400 องศาเซลเซียสทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำเม็ดสารตัวอย่างไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และปรับแต่งชิ้นสารให้มีขนาดเล็กลงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากนั้นนำชิ้นสารไปบดกรีกับชุดบดกรีก้อนอัตโนมัติ เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลอง ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)

ธาตุที่ใช้ในกระบวนการสร้าง คือ อิทเทียม แบเรียม และทองแดง ธาตุเหล่านี้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ สารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99%

ปริมาณที่ใช้ในการสร้างแต่ละครั้งจะขึ้นกับ อัตราส่วนของธาตุที่สำคัญคือ แกลโดลิเนียม แบเรียม และทองแดง ถ้าต้องการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เราต้องใช้ อัตราส่วนของธาตุ $Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$ สารประกอบที่ใช้คือ

1. อิทเทียมออกไซด์ (Y_2O_3)
2. แบเรียมออกไซด์ ($BaCO_3$)
3. คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

$$(Y = 88.9, Ba = 137.34, Cu = 63.54, C = 12, O = 15.9)$$

Y_2O_3	1 โมล หนัก	=	$(88.9 \times 2) + (15.9 \times 3)$	=	225.5 กรัม
$BaCO_3$	1 โมล หนัก	=	$137.347 + 12 + (15.9 \times 3)$	=	197.04 กรัม
CuO	1 โมล หนัก	=	$63.54 + 15.9$	=	79.44 กรัม

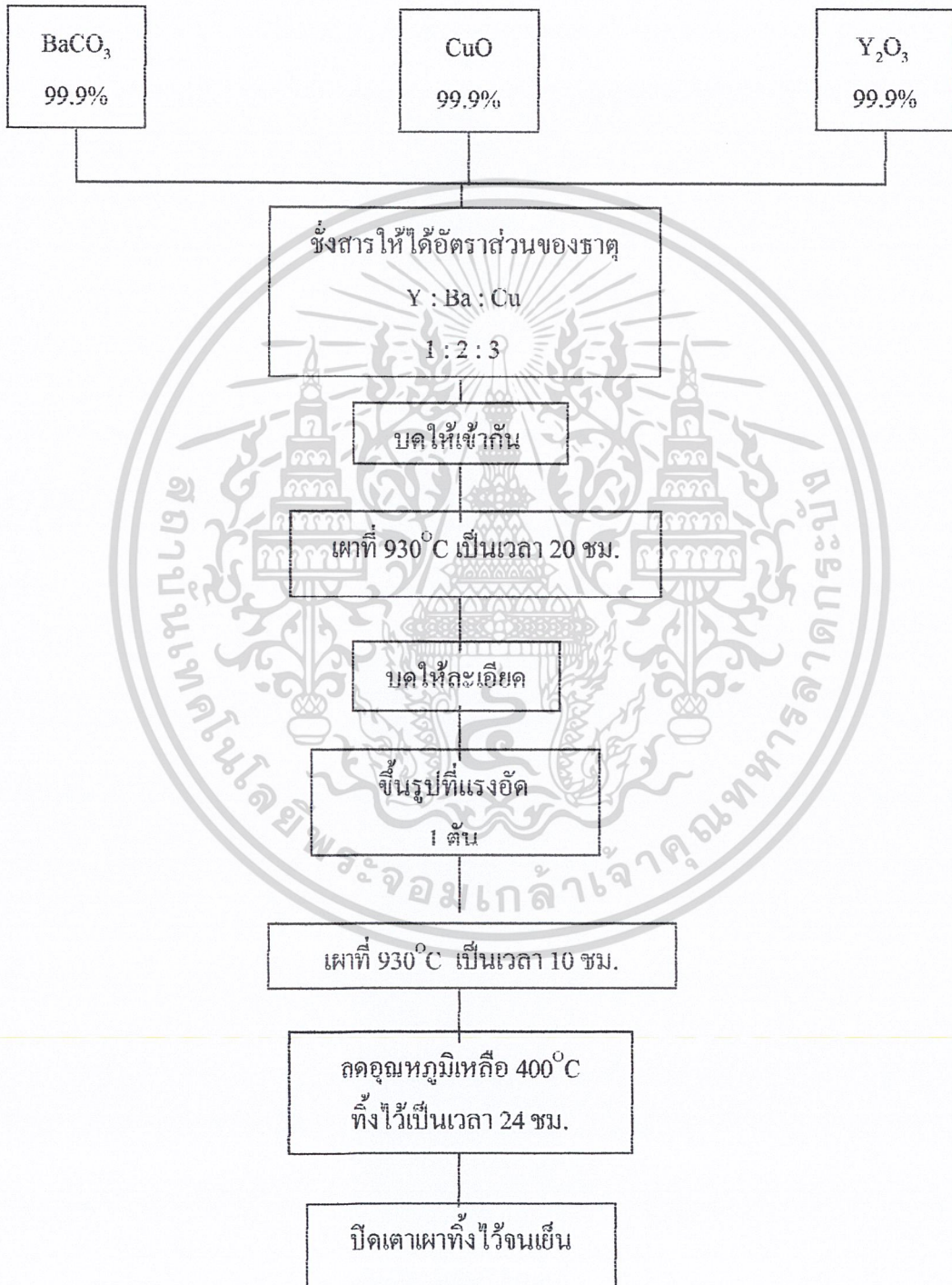
Y_2O_3	1 โมล โมเลกุล มี Y	= 2 โมลอะตอม จึงต้องใช้ Y_2O_3	= $225.5 / 2 = 112.75$ กรัม
$BaCO_3$	1 โมล โมเลกุล มี Ba	= 1 โมลอะตอม จึงต้องใช้ $BaCO_3$	= $197.04 \times 2 = 394.08$ กรัม
CuO	1 โมล โมเลกุล มี Cu	= 1 โมลอะตอม จึงต้องใช้ CuO	= $79.44 \times 3 = 238.32$ กรัม

3.2.4 วิธีการทดลอง ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$)

1. ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก $Y : Ba : Cu$ เป็น 1 : 2 : 3
2. บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ในเวลาการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่เผามาเขี่ยส่วนสีเทาออก จากนั้นนำมาบดละเอียด แล้วไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน ให้เป็นเม็ดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.
5. นำเม็ดสารมาวางบนแผ่นอะลูมินา แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 400 องศาเซลเซียสทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำเม็ดสารตัวอย่างไปทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ และปรับแต่งชิ้นสารให้มีขนาดเล็กลงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากนั้นนำชิ้นสารไปบดกรีกกับชุดบดกรีกอัลตราโซนิค เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

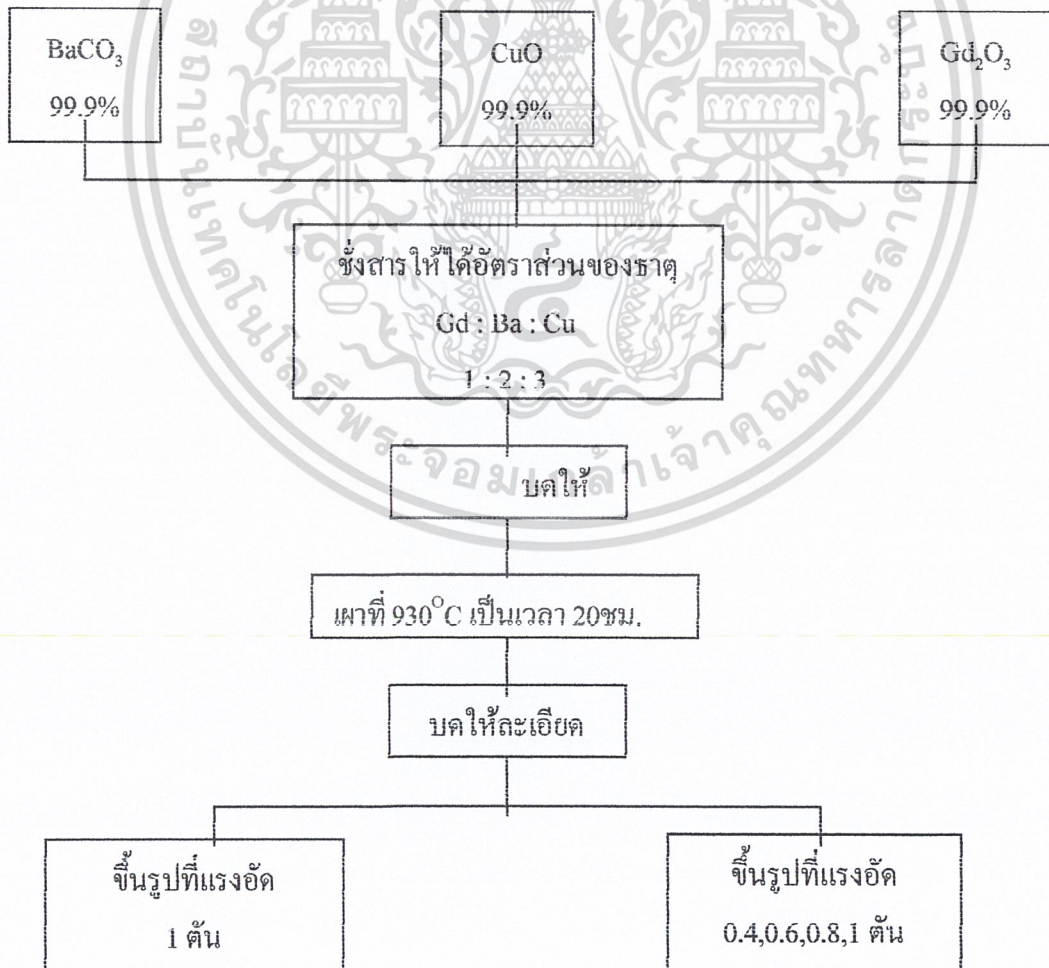


รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

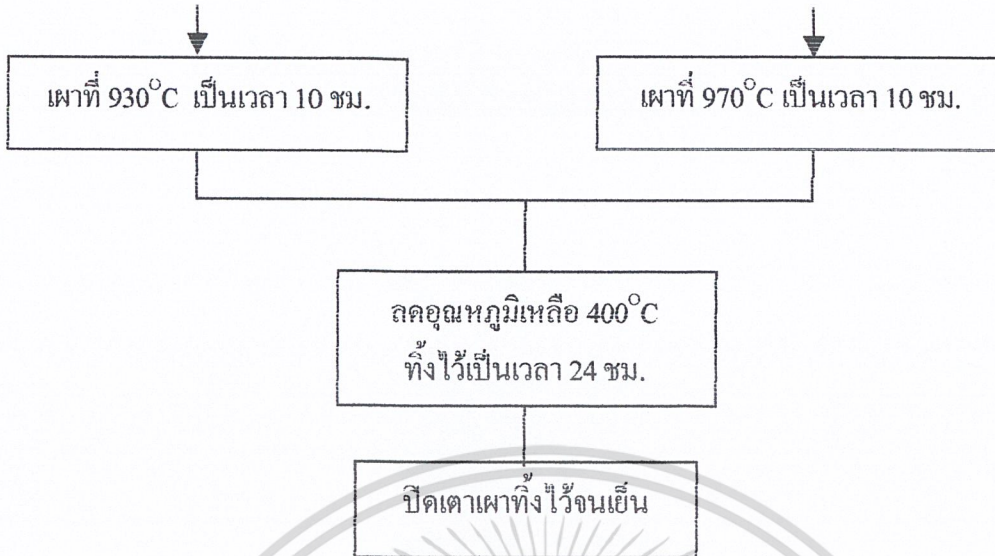
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การทดลองหาโมเดล และ การทดลองคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , $BaCO_3$, และ CuO ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3
2. บดสารประกอบทั้งสามชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส และ 970 องศาเซลเซียส ในเวลาการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่เผามาเจียส่วนสีที่เยียวออก จากนั้นนำมาบดละเอียด แล้วไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน(930 องศา) และที่แรงอัดต่างๆที่ 0.4 – 1 ตัน(970 องศา) ให้เป็นเม็ดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม.
5. นำเม็ดสารมาวางบนแผ่นอะลูมินา แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง
6. จากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 400 องศาเซลเซียสทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเผาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ เพื่อทดลองหาโมเดลและทดลองคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

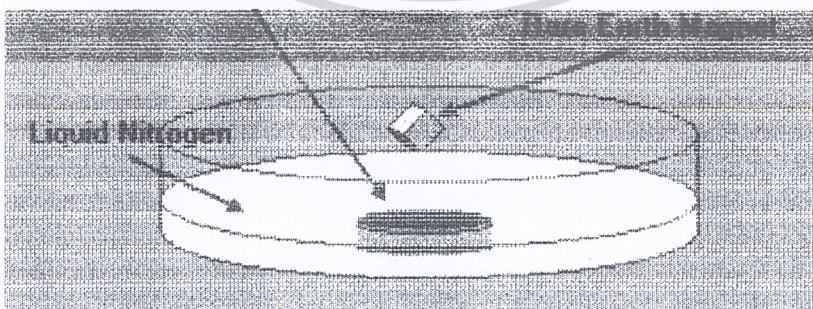
3.2.6 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลังจากผ่านกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว สารตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนการเผาตามรูปที่ 3.10 และ 3.11 แล้วจะนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่สมบูรณ์

3.2.6.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

เป็นวิธีทดสอบพื้นฐานของการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาแล้วไปลดอุณหภูมิในไนโตรเจนเหลว เพื่อเม็ดสารเกิดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังแสดงในรูปที่ 3.13

Superconductor Disk

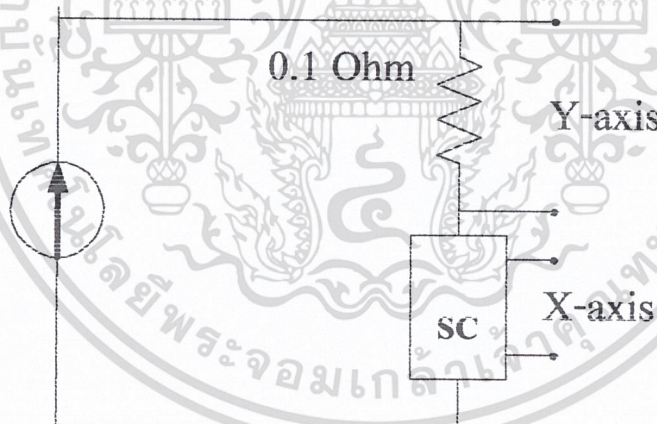


รูปที่ 3.13 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ)

การทดสอบคุณสมบัตินี้เป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.14 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) แล้ววัดแรงดันตกคร่อมขั้วนำไฟฟ้าที่ยังยวด โดยจุ่มขั้วนำไฟฟ้าลงในไนโตรเจนเหลวจะสังเกตเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะตั้งขึ้นในแนวแกน Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเลย เมื่อไม่มีกระแสไหลผ่านความต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าไบอัสให้กับขั้วนำไฟฟ้าที่ยังยวด เนื่องจากการไหลของกระแสมีค่ามากขึ้นถ้ากระแสไบอัสมีค่ามากกว่าค่ากระแสวิกฤตแล้วสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดจะถูกทำลาย เมื่อเพิ่มกระแสให้กับตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดเพิ่มขึ้นแล้วเส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด เนื่องจากการเสียดสภาพตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด เกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าขึ้น สำหรับกระแสไบอัสสูงสุดที่ป้อนให้กับขั้วนำไฟฟ้า โดยที่ขั้วนำไฟฟ้ายังมีสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดอยู่ จะกำหนดให้เป็นค่ากระแสวิกฤต (I_c) โดยที่ความหนาแน่นกระแสวิกฤต จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของขั้วนำ ไม่ขึ้นกับรูปร่าง แต่กระแสวิกฤตจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัด

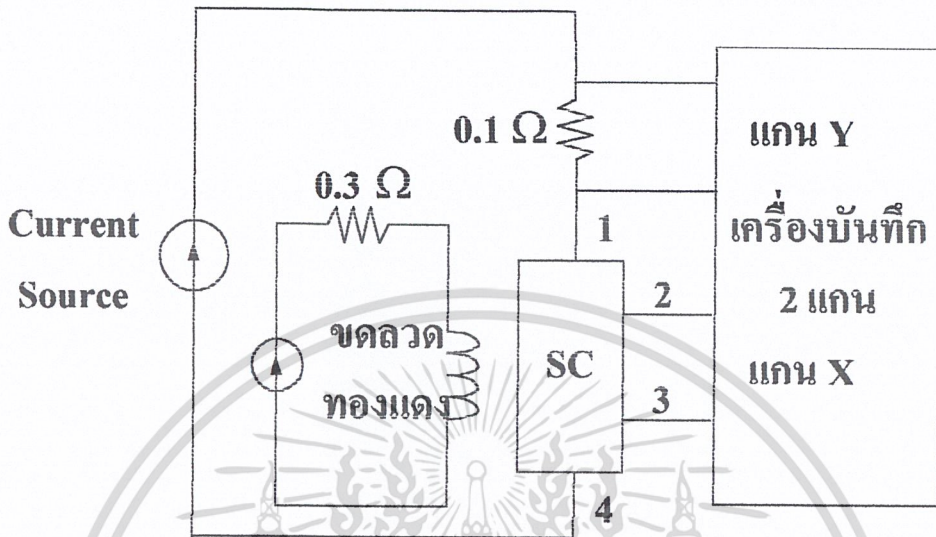


รูปที่ 3.14 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

3.2.6.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ)

การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำเป็นการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่ามากขึ้น ถ้าความเข้ม

ของสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม
ขั้วสาร สำหรับวงจรในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน
เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับขั้วสาร

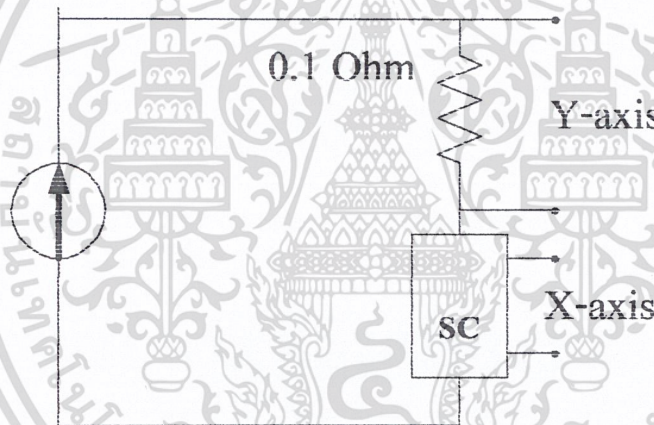
วงจรวัดกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำนี้ประกอบด้วยวงจรเดียวกับ
ชุดวงจรวัดระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ แต่เพิ่มชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก
คงที่ที่ปรับค่าได้เข้าไปในการจ่ายสนามแม่เหล็ก ในการทดลองจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง
กระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้าที่ยืดที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว เพื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมา
กระทำกับขั้วสารตัวนำไฟฟ้าที่ยืด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยยังไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำ

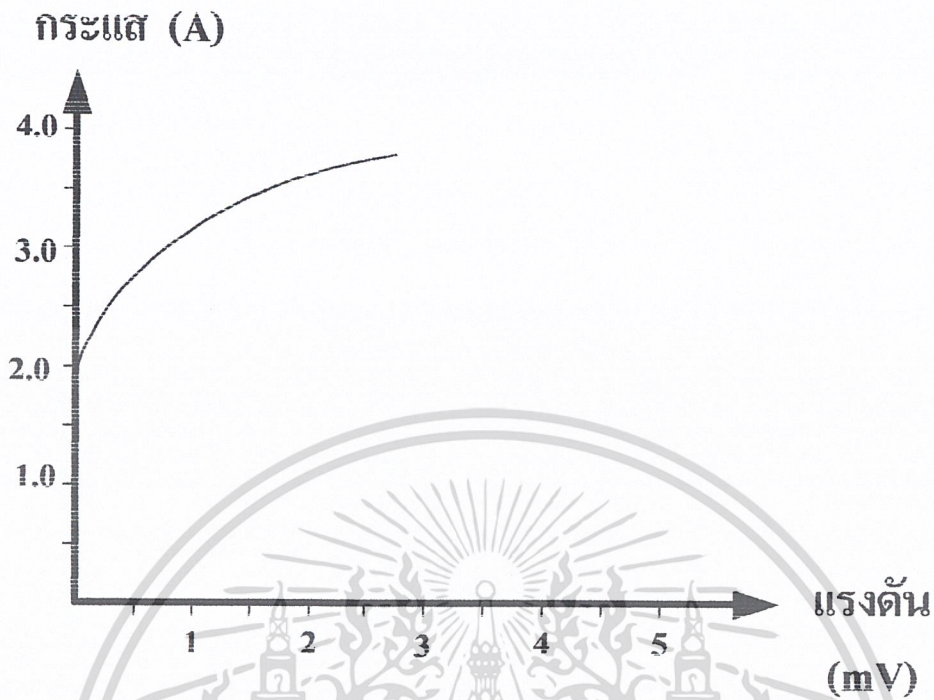
เมื่อได้เม็ดสารจากการเผาในครั้งสุดท้ายแล้ว จากนั้นจะนำไปตรวจสอบว่าเม็ดสารที่ได้มีความเป็นตัวนำยิ่งยวดหรือไม่โดยการใช้นำปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ เมื่อได้เม็ดสารที่มีความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วก็จะเป็นการทดลองวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่แรงดันระหว่างตัวนำยิ่งยวดชนิดแกด โคลิเนียม และชนิดอิตเทียม ที่มีอุณหภูมิการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส และมีแรงอัดขนาด 1 ดันเท่ากันเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำต่อชิ้นสาร ซึ่งจะใช้รูปที่ 4.1 เป็นรูปแบบในการทดลอง



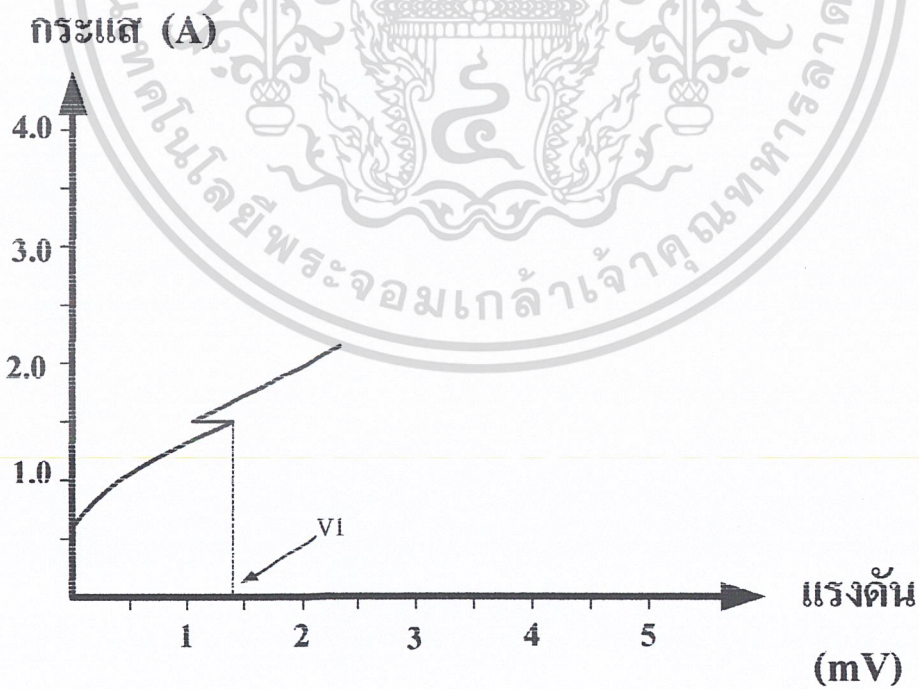
รูปที่ 4.1 วงจรวัดความสัมพันธ์ความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

จากวงจรจะใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นตัวจ่ายกระแสให้กับความต้านทาน 0.1Ω และ เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ปรับแต่งขนาดชิ้นสารแล้ว โดยที่เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกแช่ในใน โครเจนเหลวเพื่อคงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ โดยจุดวัดแรงดันที่ตัวเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเป็นแกน X และจุดวัดที่ความต้านทาน 0.1Ω จะเป็นแกน Y ซึ่งเป็นจุดวัดกระแส จากนั้นจะทำการจ่ายกระแสให้แก่วงจรซึ่งจะได้รูปกราฟของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดแกด โคลิเนียม และชนิดอิตเทียม ที่มีอุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส และแรงอัด 1 ดันเท่ากันเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นอิทเทียมที่อุณหภูมิการเผา
ที่ 930 องศาเซลเซียสที่แรงอัดขนาด 1 ตัน



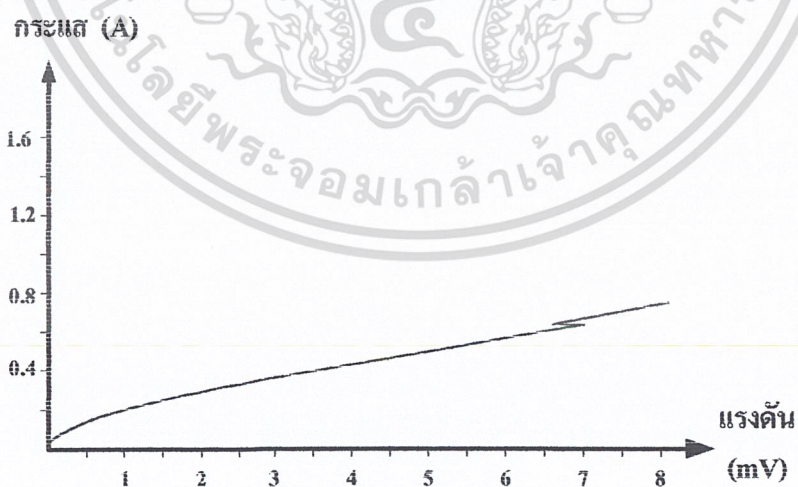
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกดโดลิเนียมที่อุณหภูมิ
การเผาที่ 930 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดแรงอัด 1 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟทั้งสองเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยใช้วงจรดังรูปที่ 4.1 ซึ่งไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำกับขั้วขั้ว โดยในรูปที่ 4.2 จะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวคดที่มีสารตั้งต้นเป็นชนิดอิทเทียม และรูปที่ 4.3 เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวคดที่มีสารตั้งต้นเป็นชนิดแกด โคลิเนียม โดยตัวนำไฟฟ้าที่ยาวคดทั้ง 2 ชนิดต่างก็มีกระบวนการสร้างที่เหมือนกันดังได้แสดงไปแล้วในบทที่ 3 โดยที่มีอุณหภูมิการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส และแรงอัดที่ 1 ตัน เท่ากันเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน

จะเห็นได้ว่าลักษณะของรูปกราฟทั้งสองจะมีลักษณะที่คล้ายกันแต่สารตั้งต้นที่เป็นอิทเทียมจะไม่มีในส่วนของ ความต้านทานเชิงลบที่จะเกิดขึ้นเฉพาะในสารตั้งต้นแกด โคลิเนียมเท่านั้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่นับว่าน่าสนใจมาก โดยในการทดลองต่อไปนี้จะเน้นในส่วนของสารตั้งต้นที่เป็นแกด โคลิเนียมเท่านั้นเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเกิดความต้านทานเชิงลบ โดยมีเงื่อนไขในการสร้างหรือการใช้สนามแม่เหล็กเข้ามากระทำกับขั้วขั้ว และ จะทำการจำลองถึงโมเดลเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายถึงปรากฏการณ์เชิงลบว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร ข้อแตกต่างอีกอย่างของกราฟทั้งสองจะพบว่าในสารตั้งต้นชนิดอิทเทียมนั้นจะมีกระแสวิกฤตที่สูงกว่าสารตั้งต้นที่เป็นชนิดแกด โคลิเนียม

จากนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาเพื่อหาว่าที่อุณหภูมิใดที่ทำให้ความต้านทานเชิงลบมีขนาดมากที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าอุณหภูมิการเผาที่ 970 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการที่จะทำให้ขนาดความต้านทานเชิงลบมีขนาดมากที่สุดในแรงอัดที่เท่าๆ กัน จากนั้นจะนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตามวงจรในรูปที่ 4.1 โดยที่มีขนาดแรงอัดต่างๆ กันดังนี้คือ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 ตัน ตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบถึงขนาดความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นว่าแรงอัดใดมีขนาดความต้านทานเชิงลบมากที่สุดซึ่งจะได้กราฟดังต่อไปนี้

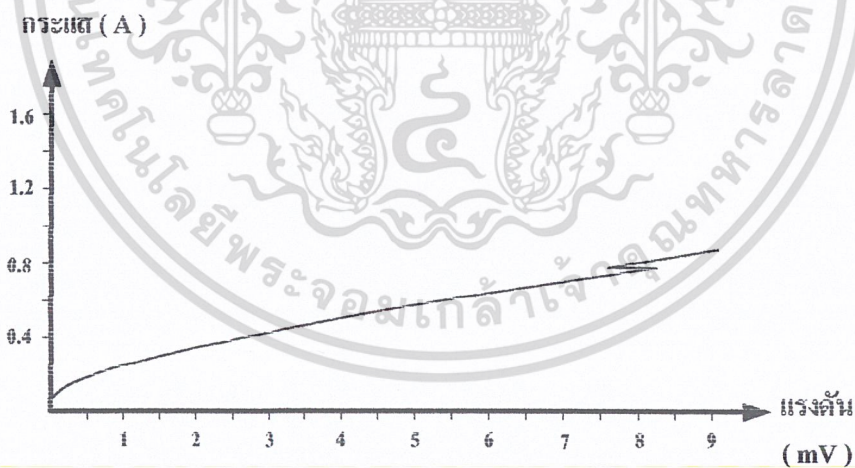


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกด โคลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

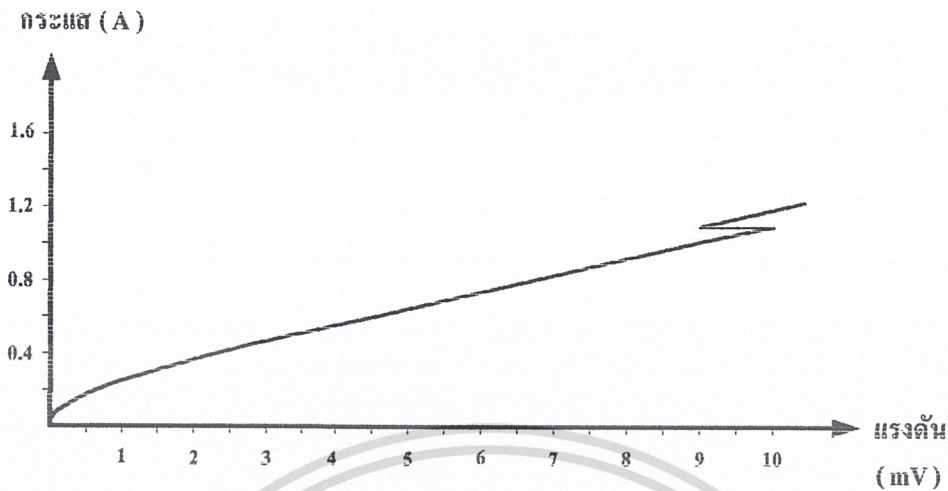


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกลโคลิเนียม
ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.6 ตัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกลโคลิเนียม
ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 0.8 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



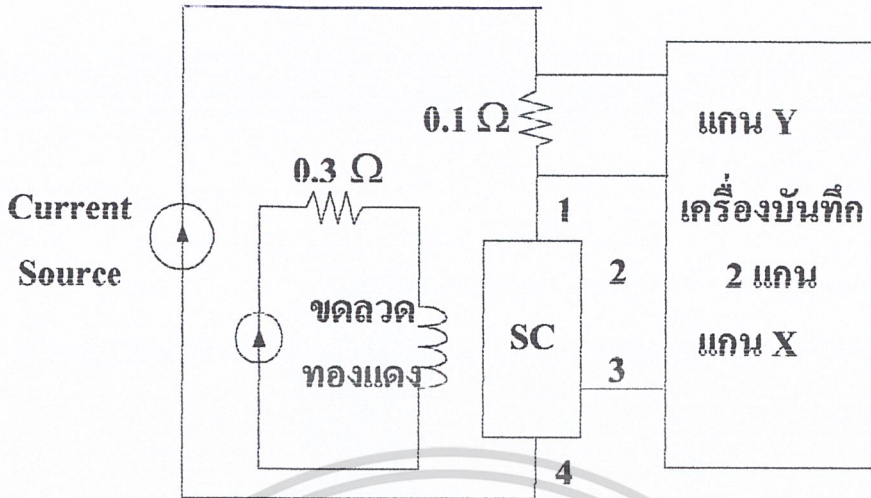
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตั้งต้นแกด โคลิเนียม ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ขนาดแรงอัด 1 ตัน

จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยกที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส จะพบว่าที่แรงอัด 1 ตันจะมีความต้านทานเชิงลบมากที่สุด และแรงอัด 0.4 ตันจะมีความต้านทานเชิงลบน้อยที่สุด

ในการทดลองครั้งรูปที่ 4.7 นั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยวดยกชนิดแกด โคลิเนียมทั้งคู่แต่มีขั้นตอนในการสร้างที่ต่างกัน โดยในรูปที่ 4.7 นั้นจะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 970 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าในรูปที่ 4.3 ที่เผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะได้รูปกราฟที่มีความต้านทานเชิงลบเหมือนกันแต่ที่อุณหภูมิการเผาที่ 970 องศาเซลเซียสนั้นจะมีขนาดของความต้านทานเชิงลบที่มากกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองในครั้งนี้จะนำไปอธิบายในรูปแบบของสมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคซึ่งจะได้อธิบายในข้อต่อไป

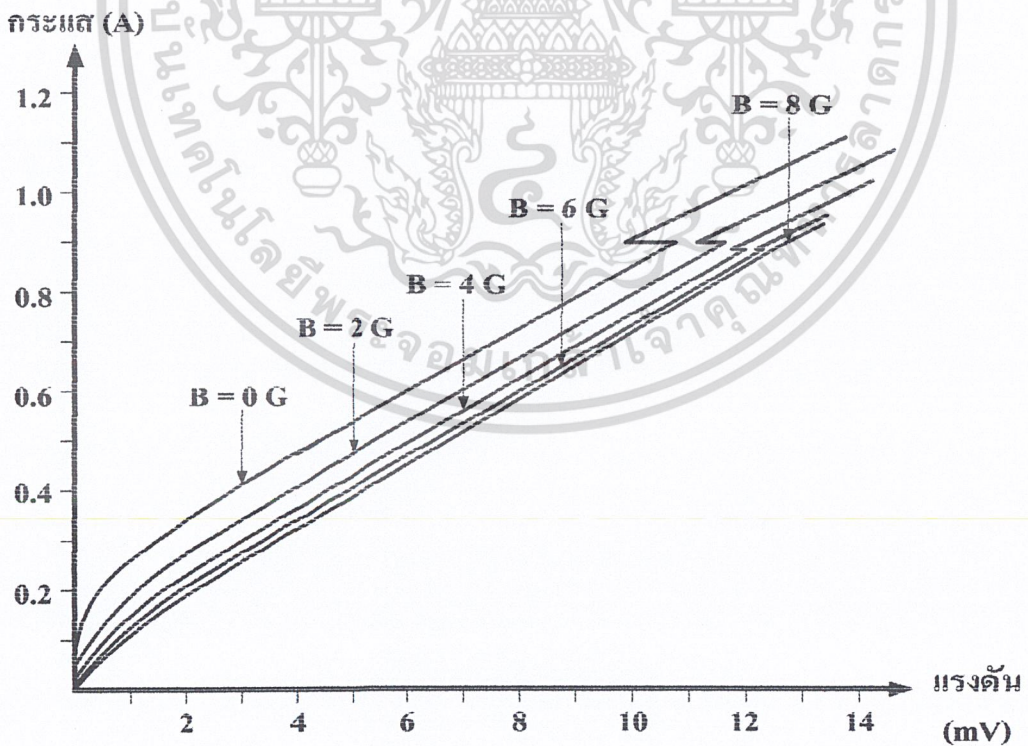
4.2 ผลการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำต่อชิ้นสาร

ในส่วนของหัวข้อ 4.1 นั้นเป็นการวัดกระแสกับแรงดันเหมือนกันแต่ยังไม่มีส่วนแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำต่อเม็ดสาร โดยในหัวข้อนี้จะนำเอาสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำ โดยเราจะนำเม็ดสารที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 970 องศาเซลเซียส และมีขนาดแรงอัดที่ 1 ตันจากรูปที่ 4.7 มาใส่ค่าสนามแม่เหล็กที่มีขนาด 2G, 4G, 6G, 8G ตามลำดับเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ในส่วนของสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปนั้นสร้างขึ้นโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ไหลผ่านขดลวดซึ่งวงจรที่ใช้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 เพื่อดูว่าค่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อขนาดของความต้านทานเชิงลบอย่างไร



รูปที่ 4.8 วงจรวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่อชิ้นสาร

โดยในการทดลองนี้จะใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 1 ตันเท่านั้นเพื่อเปรียบเทียบให้ดูถึงผลของขนาดความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่อชิ้นสารที่อุณหภูมิการเผาที่ 970 องศา แรงอัด 1 ตัน

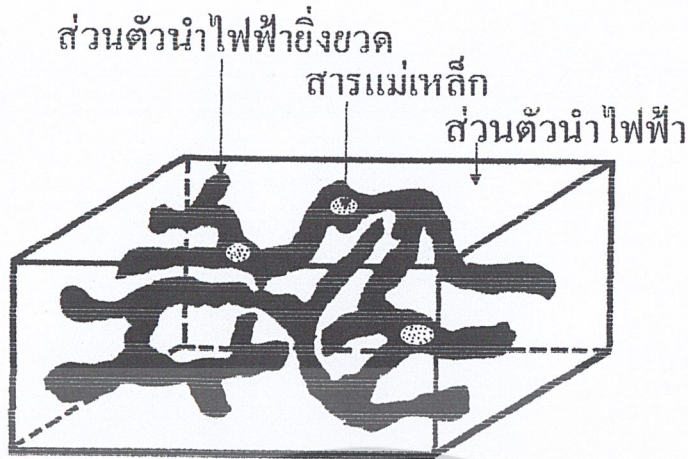
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ได้เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำต่อซินสารเราจะพบได้ว่าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำจะให้ขนาดความต้านทานเชิงลบมากที่สุด เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นขนาดความต้านทานเชิงลบจึงเริ่มมีค่าลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะนำไปอธิบายโดยใช้สมมติแบบจำลองมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และจากกราฟที่ได้จะพบว่าค่าของกระแสวิกฤติเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำจะมีค่าลดลงด้วย

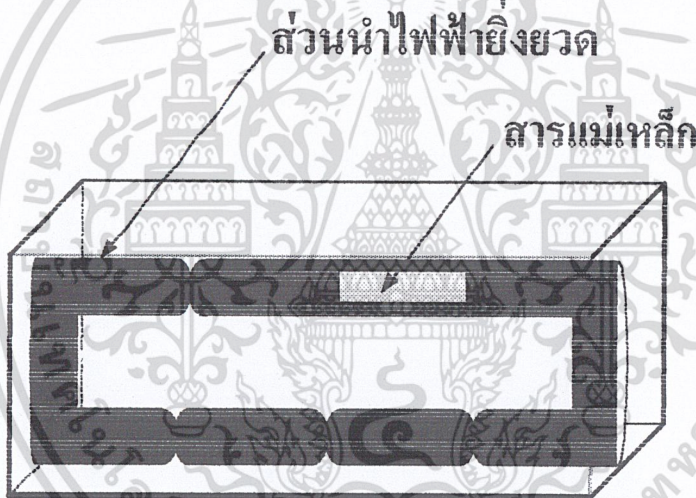
4.3 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีสารตั้งต้นเป็นแกดโดลิเนียมนั้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกและมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กภายในอยู่ด้วย ซึ่งสารแม่เหล็กนี้เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มียูภายในตัวแกดโดลิเนียม ดังนั้นถ้าเราตั้งสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นเราจะพิจารณาในเนื้อสารที่สร้างขึ้นมานั้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และ ส่วนที่เป็นตัวนำธรรมดาปะปนกันอยู่ โดยที่สารที่สร้างขึ้นมานั้นถ้าอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว หมายความว่าต้องมีเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเชื่อมต่อกันอยู่อย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเชื่อมต่อนั้นจะมีทั้งแบบที่แข็งแรงและแบบที่ไม่แข็งแรงหรือต่ออยู่อย่างหละหลวม ซึ่งเราจะเรียกว่า คอคอค โดยคอคอคนี้จะเกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างระหว่างการอัดเม็ดสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้สารเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะมีส่วนของสารแม่เหล็กอยู่ด้วยดัง ในรูปที่ 4.10 เพื่อให้ช่วยต่อความเข้าใจ เราจึงทำการจัดรูปแบบใหม่เพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้นดังรูปที่ 4.11 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งในท่อล่างจะมีบริเวณคอคอค 3 จุด และส่วนท่อนบนจะมีบริเวณคอคอคอยู่ 1 จุด และมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กอยู่ทางท่อนบนด้านขวา เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 แล้วจะพบว่าสิ่งที่จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเสียสภาพได้นั้นจะต้องทำให้ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออกจากกัน และบริเวณท่อที่จะขาดง่ายที่สุดคือส่วนคอคอค โดยสาเหตุที่จะทำให้ตัวนำไฟฟ้าเสียสภาพมีอยู่ 3 ประการคือ

1. อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ
2. การได้รับสนามแม่เหล็กมากกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤติ
3. เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤติ



รูปที่ 4.10 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$



รูปที่ 4.11 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$
เพื่อทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ

จากรูปบริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสจำนวนมากไหลผ่านท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เป็นปริมาณมากพอ ในส่วนท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีสารแม่เหล็กอยู่ก็จะขาดออกเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กภายในท่อมีขนาดใหญ่ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปเราจะนำแบบจำลองนี้มาอธิบายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในการวัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดัน

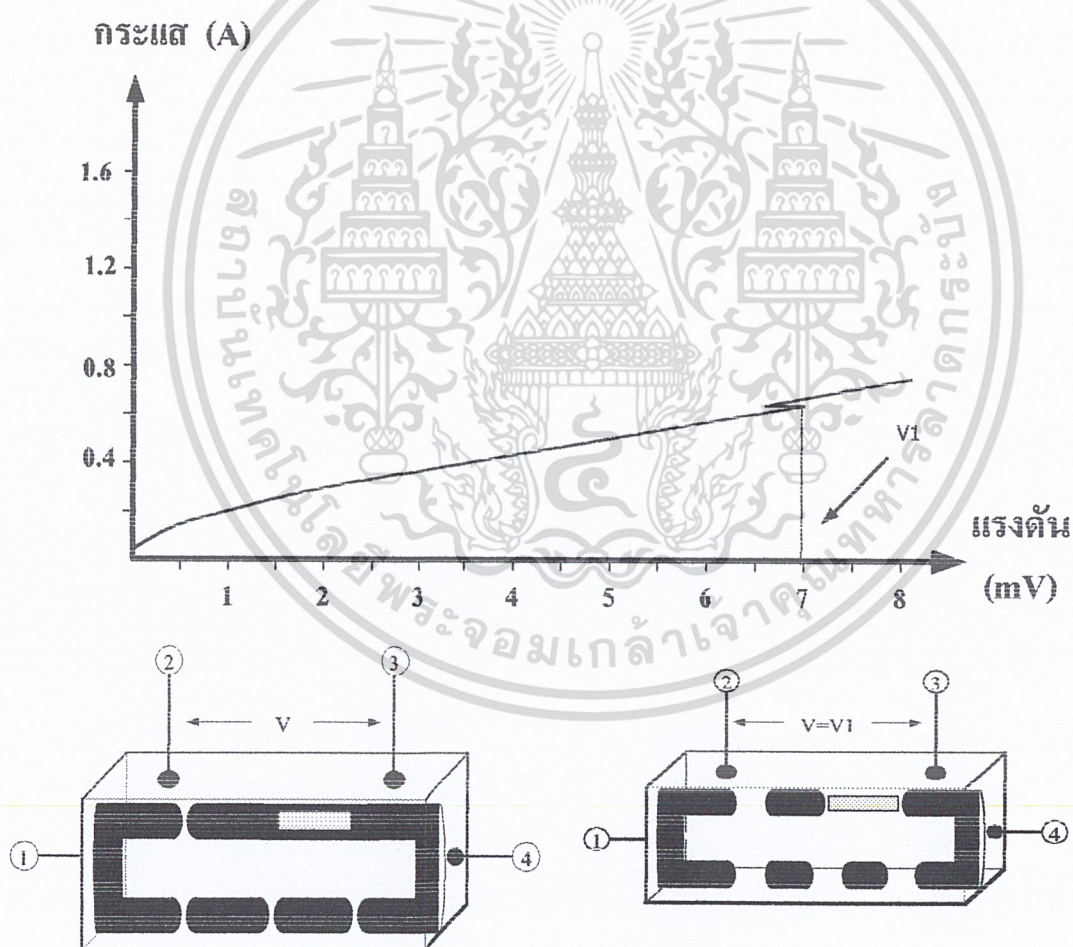
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4. การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการตั้งสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง

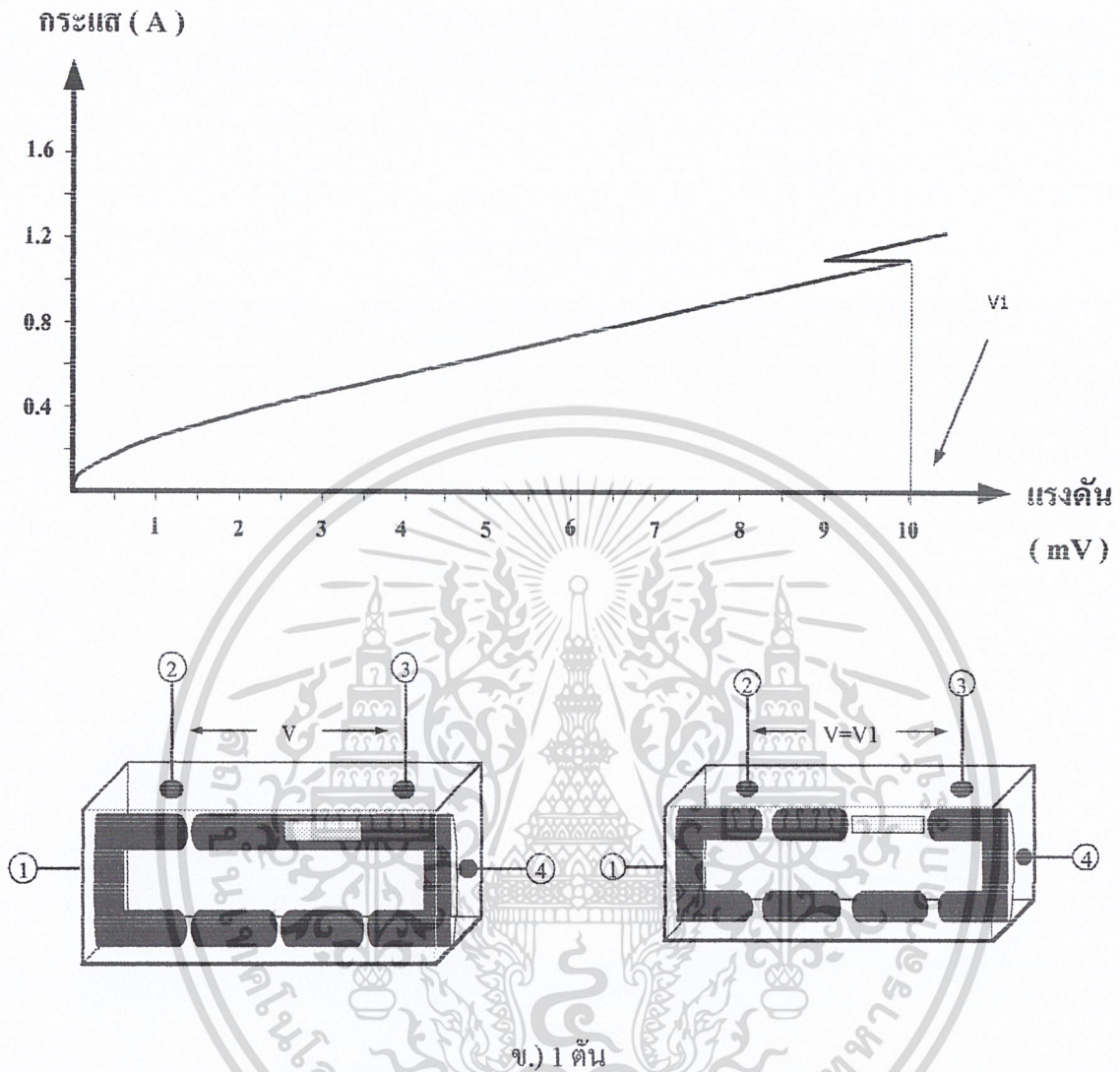
จากรูปที่ 4.4 – 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส และกำหนดแรงอัดเป็นค่าต่างๆ ซึ่งจะได้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วช่วงเวลาหนึ่ง โดยจากรูปแล้วแรงอัด 1 ตัน จะมีขนาดความต้านทานเชิงลบมากที่สุด และแรงอัดที่ 0.4 ตันจะมีความต้านทานเชิงลบน้อยที่สุด

เพื่อพิจารณาให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจน จึงจะขออธิบายเปรียบเทียบเฉพาะแรงอัด 0.4 ตันกับ 1 ตันเท่านั้น และได้ยกแบบจำลองทางมหภาคทางโครงสร้างมาอธิบายด้วยดังรูปต่อไปนี้



ก.) 0.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

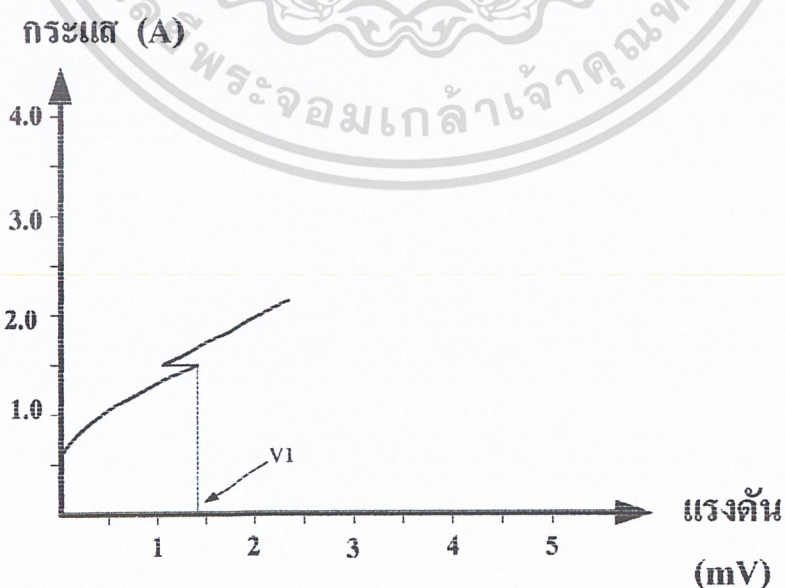


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแบบจำลอง โครงสร้างมหภาค

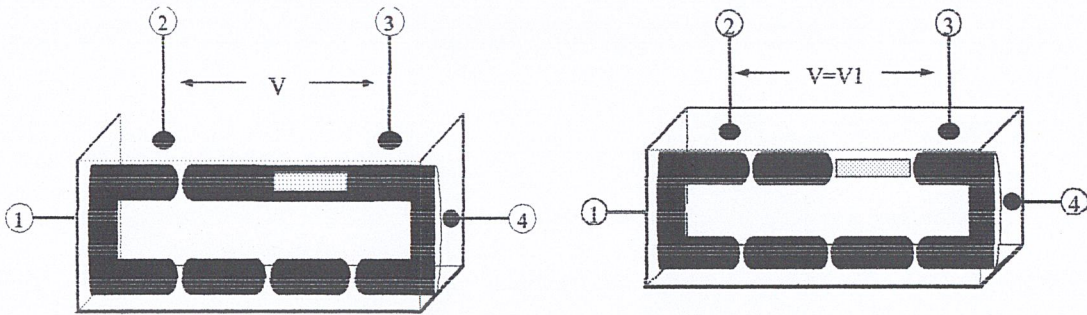
จากรูปที่ 4.12 ก. ซึ่งมีกระแสวิกฤติ 20 mA. แสดงให้เห็นว่าถ้ายังคงมีกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดในปริมาณที่น้อยกว่า 20 mA. แล้วบริเวณคอคอดทั้งหมดจะยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ จึงไม่มีแรงดันตกคร่อมตัวชิ้นสาร แต่เมื่อมีกระแสไหลเพิ่มมากขึ้นคอคอดจะเริ่มขาดออกจากกัน ถ้ากระแสที่ไหลผ่านชิ้นสารมีค่ามากกว่า 20 mA. คอคอดในส่วนล่างของท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยังขาดจะเริ่มขาดออกจากกันจนหมดจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเปลี่ยนทิศทางจากเดิมที่เคยไหลผ่านทั้งท่อด้านบนและท่อด้านล่าง มาเป็นไหลผ่านทางท่อด้านบนเพียงทางเดียว เนื่องจากด้านบนมีจุดคอคอดเพียงจุดเดียวทำให้ความต้านทานน้อยกว่าท่อด้านล่าง สาเหตุที่ทำให้คอคอดขาดออกจากกันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานบริเวณจุดขาด และเกิดเป็นแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น เนื่องจากคอคอดด้านบนมีส่วนขาดแคบกว่าคอคอดด้านล่าง ทำให้กระแสไหลได้ที่ท่อด้านบนมากกว่า และเมื่อป้อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเพิ่มมากขึ้นไปอีก ทำให้คอคอดทั้งด้านบนและด้านล่างขยายตัวมากขึ้นไปอีก แรงดันที่ตกคร่อมขั้วสารจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเราได้ป้อนกระแสถึงค่าๆหนึ่งจะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดัดด้านบนที่มีส่วนของสารแม่เหล็กอยู่ขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับคอคอด ทำให้แรงดันไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าทางท่อด้านบนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสทั้งหมดจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อด้านล่างแทนซึ่งความต้านทานต่ำกว่า ทกให้แรงดันตกคร่อมขั้วสารลดลงอย่างรวดเร็วถึงค่าๆหนึ่ง จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าความต้านทานเชิงลบ แต่ความต้านทานเชิงลบที่ได้ที่แรงอัด 0.4 ดันนี้มีขนาดเล็ก เนื่องจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างท่อบนและท่อล่างมีไม่มาก เมื่อป้อนกระแสเพิ่มเข้าไปอีกแรงดันที่ตกคร่อมขั้วสารก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากคอคอดขยายตัว

ในรูปที่ 4.12 ข. เป็นเม็ทสารที่มีแรงอัด 1 ดัน ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤติเป็น 40 mA. ซึ่งสูงกว่าขนาดแรงอัด 0.4 ดัน เนื่องจากใช้แรงอัดมากกว่าทำให้ตัวขั้วสารมีความแข็งแรงมากขึ้น ในการอธิบายแบบจำลองของแรงอัด 1 ดันนี้ก็คล้ายๆกับ 0.4 ดัน โดยเมื่อเราป้อนกระแสมากกว่ากระแสวิกฤติ ส่วนที่เป็นคอคอดจะขาดออกจากกัน กระแสจึงไหลผ่านท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดัดด้านบนเนื่องจากความต้านทานน้อยกว่าท่อด้านล่างดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้วเช่นเดียวกับรูปที่ 4.12 ข. เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจุดขาดบริเวณคอคอดจะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกแต่เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วสารที่มีขนาดแรงอัด 0.4 ดันแล้วยังขยายตัวน้อยกว่า เนื่องจากความแข็งแรงของขั้วสารแรงอัด 1 ดันมีมากกว่า ความต้านทานบริเวณคอคอดมีน้อยกว่า เมื่อป้อนกระแสจนถึงค่าของ V_1 บริเวณท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดัดในส่วนที่มีสารแม่เหล็กอยู่จะขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้าง กระแสไฟฟ้าจึงเปลี่ยนมาไหลที่ท่อตัวนำไฟฟ้าด้านล่างแทน เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าที่ด้านล่างมีค่าน้อยกว่าท่อด้านบน แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจึงมีค่ามาก ความต้านทานเชิงลบจึงมีขนาดใหญ่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

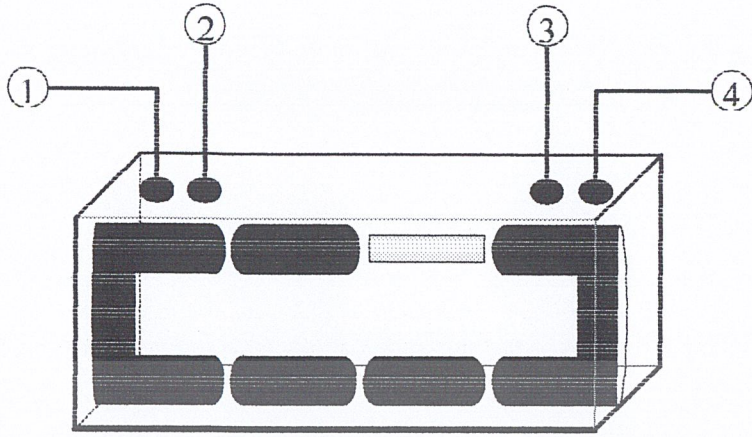


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน และแบบจำลอง โครงสร้างมหภาค
ของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่สุดอุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส แรงอัด 1 ตัน

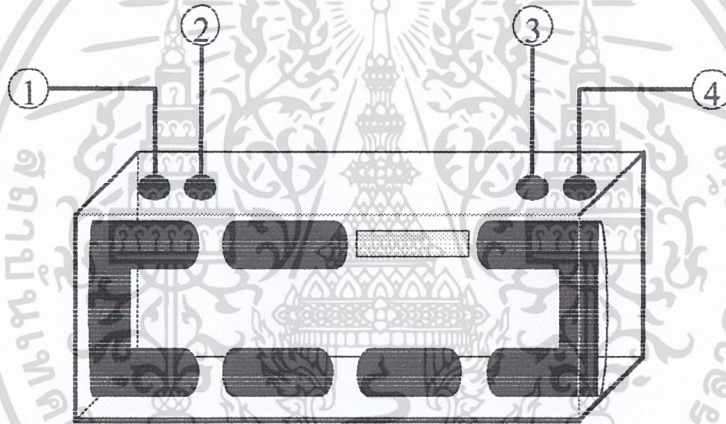
เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.13 เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่สุดที่สร้างโดยมีอุณหภูมิการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส มีขนาดแรงอัด 1 ตัน พบว่ากระแสวิกฤติที่มีค่าสูงเป็น 0.6 A และความต้านทานเชิงลบจะเริ่มเกิดที่ค่าแรงดันต่ำๆ การที่กระแสวิกฤติสูงนี้แสดงว่าส่วนที่เป็นคอคอดและเนื้อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวมีความแข็งแรงมาก ต้องป้อนกระแสถึง 0.6 A จึงจะทำให้คอคอดขาดออกจากกัน ดังนั้นถ้าเราป้อนกระแสที่มากกว่ากระแสวิกฤติเข้าไปแล้วคอคอดจะขยายตัวและขาดออกจากกัน โดยคอคอดด้านล่างจะขาดออกก่อน ทำให้กระแสไฟฟ้าจะไหลที่ท่อด้านบนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเหมือนกับการอธิบายมาข้างต้นแล้ว จากนั้นเมื่อป้อนกระแสมากขึ้นไปอีกส่วนที่เป็นคอคอดจะขาดออกจากกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากบริเวณคอคอดมีความแข็งแรงมาก จึงทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารมีค่าเพิ่มเล็กน้อย เมื่อป้อนกระแสจนถึงจุด V_1 จะทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบขึ้น การที่ความต้านทานเชิงลบเกิดที่แรงดันต่ำๆนี้เนื่องมาจากค่ากระแสวิกฤติที่มีค่าสูงและมีค่าใกล้เคียงกับกระแสที่ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบ

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้อง

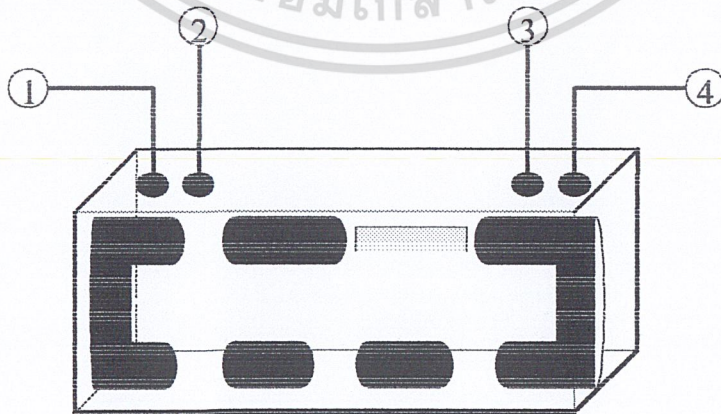
จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยมีสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้องซึ่งทำให้เราได้กราฟดังรูปที่ 4.9 นั้น โดยจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่สุดอุณหภูมิการเผาที่ 970 องศาเซลเซียส และมีขนาดแรงอัด 1 ตัน ซึ่งเราจะพบว่ายิ่งให้สนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤติ และขนาดความต้านทานเชิงลบมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคได้ดังนี้



ก.) ไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากกระทำ $B = 0 \text{ G}$

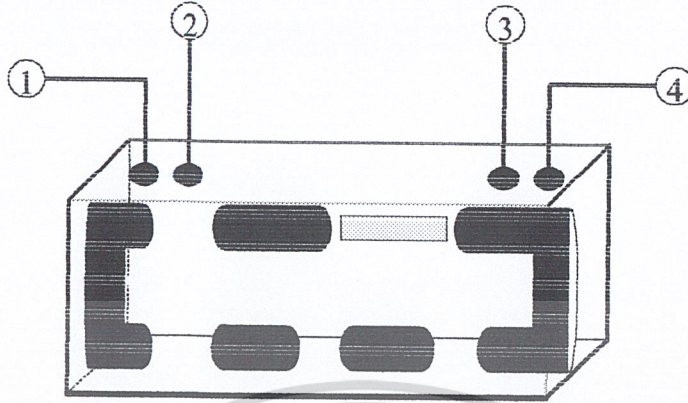


ข.) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากกระทำ $B = 2 \text{ G}$

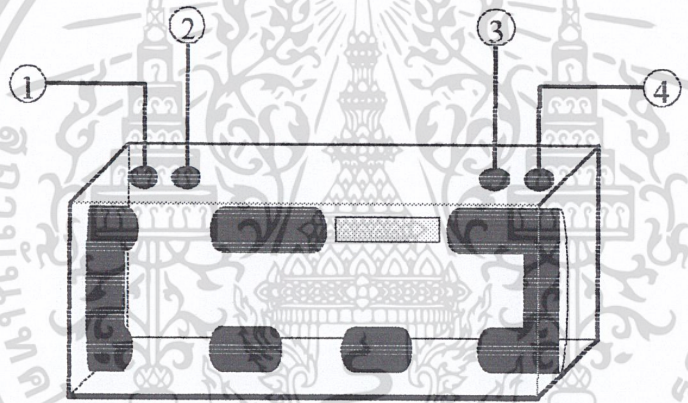


ค.) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากกระทำ $B = 4 \text{ G}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง.) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากระทำ $B = 6 \text{ G}$



จ.) เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกมากระทำ $B = 8 \text{ G}$

รูปที่ 4.14 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดย เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ โดยมีอุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส แรงอัด 1 ตัน

จากรูปที่ 4.14 เป็นแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ โดยในรูป ก.) นั้นยังไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ โดยขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบนั้น คอคอดค้ำกลางจะขาดออกจากกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับส่วนที่ขาดค้ำบน ทำให้กระแสส่วนใหญ่เปลี่ยนไปไหลทางท่อค้ำล่างแทน แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารจึงมีค่าลดลง ความแตกต่างระหว่างแรงดันท่อค้ำบนกับท่อค้ำล่างแตกต่างกันมาก ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบที่มีขนาดใหญ่

เมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอก 2 G แก่ชิ้นสาร ดังรูป ข. ซึ่งจะพบว่ากระแสวิกฤติมีค่าลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกมาทำลายส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยทำให้คอคอดค้ำและขยายตัว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง่ายขึ้นกว่าเดิม เป็นผลทำให้ความต้านทานเชิงลบมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะได้อธิบายในรูปแบบของการจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้ามากกว่ากระแสวิกฤติจะทำให้คอคอดขาดออกจากกัน และขยายตัวอย่างรวดเร็วกว่าไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้น เมื่อป้อนกระแสจนกระทั่งถึงจุดความต้านทานเชิงลบทำให้ท่อตัวนำด้านบนในส่วนที่มีสนามแม่เหล็กขาดออกเป็นบริเวณกว้าง กระแสจึงไหลไปทางท่อด้านล่างซึ่งความต้านทานน้อยกว่า แรงดันที่ตกคร่อมขึ้น สารจึงลดลงแต่ไม่มากนัก เนื่องจากแรงดันตกคร่อมระหว่างท่อบนและท่อล่างมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้ได้ความต้านทานเชิงลบมีขนาดเล็กลง

เมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กขึ้นเป็น 4G , 6G, 8G ก็จะทำให้ได้ความต้านทานเชิงลบมีขนาดเล็กลงตามลำดับ และกระแสวิกฤติก็ลดลงตามลำดับด้วย โดยที่สนามแม่เหล็ก 8 G นั้นจะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดด้านบนและด้านล่างมีความกว้างเท่ากันกระแสไฟฟ้าจึงไหลได้ทั้งท่อบนและท่อล่างเท่ากัน ดังนั้นความแตกต่างของแรงดันระหว่างท่อด้านบนและด้านล่างจึงต่างกันน้อยมาก ทำให้ไม่ปรากฏความต้านทานเชิงลบขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษาตัวนำไฟฟ้าที่ยาวของพระจอมเกล้าลาดกระบังได้มีการสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอยู่ 2 ชนิดคือชนิดสารตั้งต้นที่เป็นแกด โคลิเนียม และอีกชนิดคือสารตั้งต้นชนิดอิทเทียม เมื่อทำการศึกษาตัวนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดแล้วจะพบว่าสารตั้งต้นที่เป็นแกด โคลิเนียมจะเกิดมีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจในการศึกษาเป็นอย่างมาก ดังนั้นเราจึงต้องสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยาวชนิดแกด โคลิเนียมขึ้นมาเพื่อการทดลอง โดยในกระบวนการสร้างจะทำการเผาตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส และ 970 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันที่แรงอัดขนาดเท่ากันที่ 1 ตัน จากนั้นที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียสจะแบ่งแรงอัดออกเป็น 0.4, 0.6, 0.8, 1 ตัน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้นำสนามแม่เหล็กมาใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกันด้วย จากนั้นจะใช้สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวมาอธิบายเหตุผลที่เกิดขึ้น

ในการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้าที่ยาวชนิดแกด โคลิเนียมที่อุณหภูมิการเผา 970 และ 930 องศาเซลเซียส ที่แรงอัด 1 ตันเท่ากัน พบว่า อุณหภูมิการเผา 970 องศาจะให้ขนาดความต้านทานเชิงลบมีค่ามากกว่าการเผาที่ 930 องศาเซลเซียส ดังนั้นเรจึงนำอุณหภูมิการเผาที่ 970 องศาเซลเซียสนี้มาแบ่งเป็นแรงอัดค่าต่างๆในขณะที่ทำการสร้าง ซึ่งแบ่งเป็น 0.4, 0.6, 0.8, 1 ตัน เพื่อศึกษาว่าแรงอัดใดมีขนาดความต้านทานเชิงลบมากที่สุด ปรากฏว่าที่แรงอัด 1 ตันให้ขนาดความต้านทานเชิงลบมากที่สุด จากนั้นเราจะนำเม็ดสารที่มีแรงอัด 1 ตันมาทดลองใส่สนามแม่เหล็กภายนอก เพื่อทดลองว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อความต้านทานเชิงลบหรือไม่ โดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีขนาดเป็น 2G, 4G, 6G และ 8G ซึ่งผลที่ได้ก็คือยิ่งค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นเท่าใดจะทำให้ขนาดความต้านทานเชิงลบ และกระแสก็ยิ่งลดลงไป โดยที่ค่าสนามแม่เหล็ก 8G นั้นแทบจะมองไม่เห็นขนาดความต้านทานเชิงลบเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. เทพนารินทร์ ประพันธ์, “วัสดุอุตสาหกรรม”, สกายบุ๊กส์, กรุงเทพฯ, 2539
2. สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร, พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์, สัญญา คุณขาว, วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และสมเกียรติ สุภเดช, “การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรไซด์ฟิซนิคตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
3. สมชาติ พนาเกษม, พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์, เฉชา ยศศักดิ์ศรี และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “การหาเงื่อนไขอุณหภูมิกการเผาคอสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $\text{GBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37, 2542, หน้า 378 – 383
4. พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์, “การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO / GBCO”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
5. ศุภยวัจน์ จอมแสง, “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้