

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิกที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ
EFFECT OF EXTERIOR MAGNETIC FIELD TO
SUPERCONDUCTOR OF $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ TYPE CERAMIC
AT DIFFERENCE TEMPERATURE BURN



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิกที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

**EFFECT OF EXTERIOR MAGNETIC FIELD TO
SUPERCONDUCTOR OF $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ TYPE CERAMIC
AT DIFFERENCE TEMPERATURE BURN**



โดย

นาย คมกานต์ ลุนธิระวงศ์ รหัส 46015255

นาย สติธิเวช เสถียรอินทร์ รหัส 46015287

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงาน ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

$GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิกที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

ผู้จัดทำ

นาย คมสันต์ ลุนธิระวงศ์ รหัส 46015255

นาย สิทธิเวช เสด็ยอินทร์ รหัส 46015287



(รศ. ดร.วิสุทธิ จุติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิกที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

นายคมสันต์ คุณธีระวงศ์ รหัส 46015255

นายสิทธิเวช เสถียรอินทร์ รหัส 46015287

รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

จากการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่อุณหภูมิ 77K พบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น (Negative Resistance) ซึ่งอุณหภูมิการเผาต่างๆมีผลต่อค่ากระแสวิกฤติ (I_c) และขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (ΔV) ขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ รวมทั้งผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อ I_c และ ΔV ซึ่งเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารมีค่ามากขึ้นทำให้ค่ากระแสวิกฤติ (I_c) ลดลงและพบว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง เมื่อให้สนามแม่เหล็กค่าต่ำในช่วงแรกและเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ΔV จะลดลง และยังได้นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ มาใช้อธิบายผลจากการทดลองได้อย่างสอดคล้อง

**Effect of exterior Magnetic Field to
Superconductor of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ Type Ceramic
at difference temperature burn**

Mr.Komsan Luntirawong ID.46015255

Mr.Sitthiwet Satianin ID.46015287

Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

Education Year 2005

Abstract

From experiment to measure relation between current and voltage in Superconductor of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ at 77K. Discover it has Negative Resistance by mean of difference temperature burn have effect to Critical Current (I_c) and Voltage (ΔV) when happen Negative Resistance including effect of exterior Magnetic Field to I_c and ΔV . When exterior Magnetic Field to increase it effect to decrease I_c and ΔV when happen Negative Resistance will increase to reach value. When start increase exterior Magnetic Field to Superconductor then continue increase exterior Magnetic Field it effect to decrease ΔV . Moreover this paper have use Macrostructure model of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ for explain to conform with result of the experiment.

กิตติกรรมประกาศ

การที่รายงานฉบับนี้เป็นรูปเล่มได้นั้น กระผมกราบขอขอบคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นผู้ดูแลและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา project ขอขอบคุณพี่วิสิฏฐ์ วงศ์สุธิธรรม พี่รุ่งทิวี ปิยนันท์จรัสศรี, พี่ปิยะบุตร ขวัญเมือง ผู้ให้คำปรึกษา วางแนวทางการทดลอง ทั้งยังแนะนำวิธีการทดลองเกี่ยวกับการสร้างและทดลองสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด รวมไปถึงการรวบรวมข้อมูลต่างๆมาให้เห็นค่าและทำการศึกษารวมทั้งพี่ๆที่อยู่ในห้อง superconductor จนกระทั่งรายงานฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลงได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ซึ่งให้กำเนิด ให้การอบรมสั่งสอนและยังสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด

นาย คมสันต์ ฉุนธิระวงศ์

นาย สิทธิเวช เสถียรอินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
Abstract	
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	2
1.2 การจัดกลุ่มสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด	3
1.3 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ I และประเภทที่ II	3
1.4 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด	5
1.4.1 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)	5
1.4.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)	6
1.4.3 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)	6
1.5 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	7
1.5.1 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)	7
1.5.2 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)	8
1.5.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)	10
1.6 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	10
1.6.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	10
1.7 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)	11
1.7.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ	11
1.7.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)	11
1.7.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)	12
1.8 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	13
1.8.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์	13
1.8.2 งานด้านระบบกำลัง	14
1.8.3 ด้านการคมนาคม	15
1.8.4 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	17
2.1 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก	17
2.1.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)	17
2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	20
2.2.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้า	21
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง	23
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	23
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
3.1.2 ชุดบัคกรี้อลตราโซนิก	24
3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance and Temperature control)	24
3.1.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	25
3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O	26
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
3.2.2 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	27
3.2.3 ขั้นตอนกระบวนการเผา	28
3.2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	30
3.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	31
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	49
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	30
รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	30
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	31
รูปที่ 3.9 รูปทรงของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง	32
รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	32
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 930 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับปริมาณสนามแม่เหล็ก	33
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ	34
รูปที่ 3.14 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 930 องศาเซลเซียส	38
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 950 องศาเซลเซียส	39
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 950 องศาเซลเซียส	40
รูปที่ 3.17 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 950 องศาเซลเซียส	43
รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 970 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลง แรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิกะเปาะ 970 องศาเซลเซียส	44
รูปที่ 3.20 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะเปาะ 970 องศาเซลเซียส	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

หน้า

26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes	2
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ I ข) ประเภทที่ II	4
รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส	6
รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	8
รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	8
รูปที่ 1.6 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์	9
รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ	11
รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)	12
รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)	12
รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก	18
รูปที่ 2.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	19
รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้า	19
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	20
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	21
รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้า	22
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
รูปที่ 3.2 ชุดบัตกรี้อตราโซนิค	24
รูปที่ 3.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ	25
รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	26
รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O	29

บทที่ 1

บทนำ

โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะมีการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อนเนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตัวนำนั้น ๆ สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีมีความต้านทานไฟฟ้าเกิดขึ้นในขณะที่นำไฟฟ้า สามารถนำไฟฟ้าในปริมาณสูงๆ ได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนดังที่เกิดขึ้นกับตัวนำธรรมดา ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มีผู้สนใจในการที่จะนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้อย่างกว้างขวาง

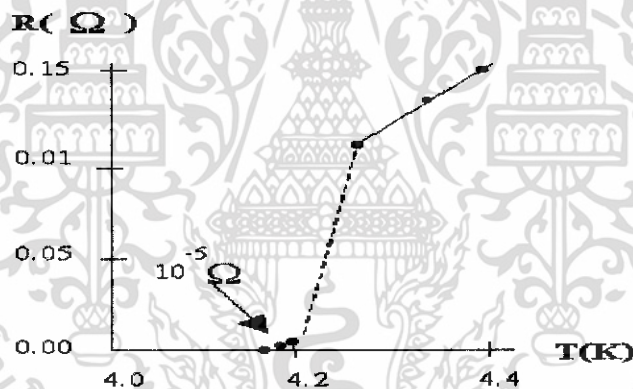
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง (HTSC) สามารถทำได้โดยสารหลายชนิด แกลโคลิเนียม (Gd) ก็เป็นสารอีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาทำเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยใช้อัตราส่วนของ Gd-Ba-Cu-O เป็น 1 : 2 : 3 ทำการเผาและอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้สามารถแสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect) ปรากฏการณ์ซีลสบี (Silsbee effect) และปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) ได้เป็นอย่างดี รวมถึงปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง คือ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งจากการวิจัยพบว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) และค่ากระแสวิกฤต (I_C) ก็คือ สนามแม่เหล็กภายนอก

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor : LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor : HTSC) กันอย่างต่อเนื่องที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O) และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd-Ba-Cu-O) แบบเซรามิก ที่ได้จากระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก กลุ่มผู้วิจัยยังได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกขึ้น เพื่อนำมาอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งก็สามารถนำมาอธิบายได้อย่างสอดคล้อง

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปกติในโลหะตัวนำโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้น ซึ่งนักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป นาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวโดยใช้ปรอทเป็นวัสดุในการทดลอง

ปี ค.ศ. 1911 นาย Heike Kamerlingh ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมากๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 K ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

นอกจากนี้ นาย Onnes ยังพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะชนิดอื่นๆ รวมทั้งโลหะผสมอีกหลายชนิด ทำให้นาย Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913 หลังจากนั้นก็มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 K จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 20 K และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 K) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเทียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงถึง 54 K จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ได้ทำการทดลองกับธาตุิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95K ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแก่วงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ใน ไตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 K (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งในไตรเจนเหลวนี้นี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 K ให้ได้

1.2 การจัดกลุ่มสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด

สารกึ่งตัวนำยิ่งยวด แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

Type I: ได้แก่ ธาตุบริสุทธิ์ พวก In, Sn, Tl ให้สนามวิกฤตต่ำ มีช่วงความยาวพร้อมเพรียง ยาวกว่าความลึกซึมซาบ ซึ่งไม่เหมาะนำมาประยุกต์ใช้งาน

Type II: ได้แก่ โลหะพวก Alloys, Ceramics ที่ได้จากการผสมสารต่างๆเข้าด้วยกัน(ธาตุผสม) มีช่วงความยาวพร้อมเพรียงสั้นกว่าความลึกซึมซาบจะให้สนามวิกฤตจาก H_{c1} ถึง H_{c2} ที่กว้างกว่านำไปประยุกต์ใช้งานได้

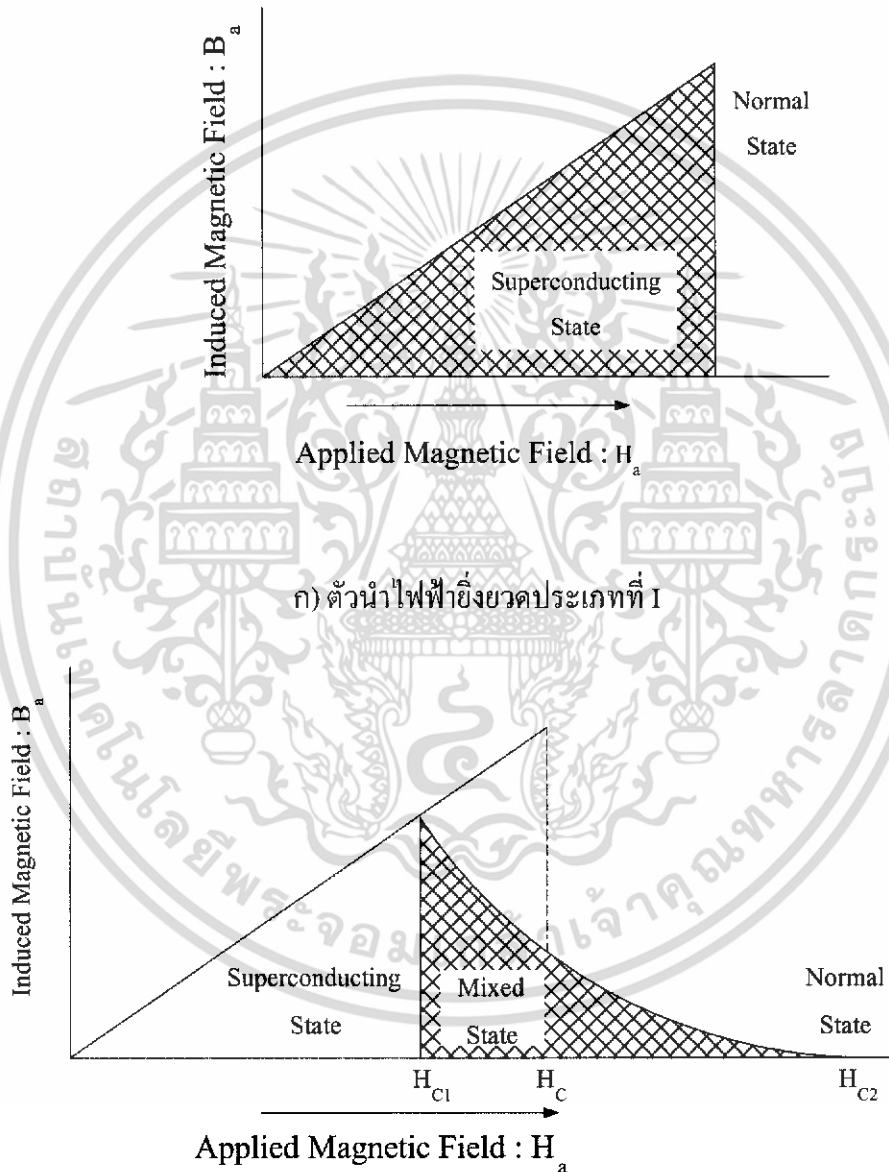
จากการศึกษาวิจัยพบว่าสารกลุ่ม Ceramics (ซึ่งมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในอุณหภูมิห้องได้เร็ว) สามารถนำมาสร้างเป็น Superconductor ได้ดีกว่าสารพวกโลหะ (ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในอุณหภูมิห้องได้ดี)

1.3 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ I และประเภทที่ II

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั้นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{M} = -\vec{H}_a$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีคุณสมบัติเป็น ไดอะแมกเนติกที่สมบูรณ์ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ I ส่วนมากมักจะเป็นพวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ II มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, $\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$ เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ I กับประเภทที่ II อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์นั่นเอง



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ I ข) ประเภทที่ II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 1.2 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (H_a) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization (M) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ I สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ II จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้ จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{c1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{c2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

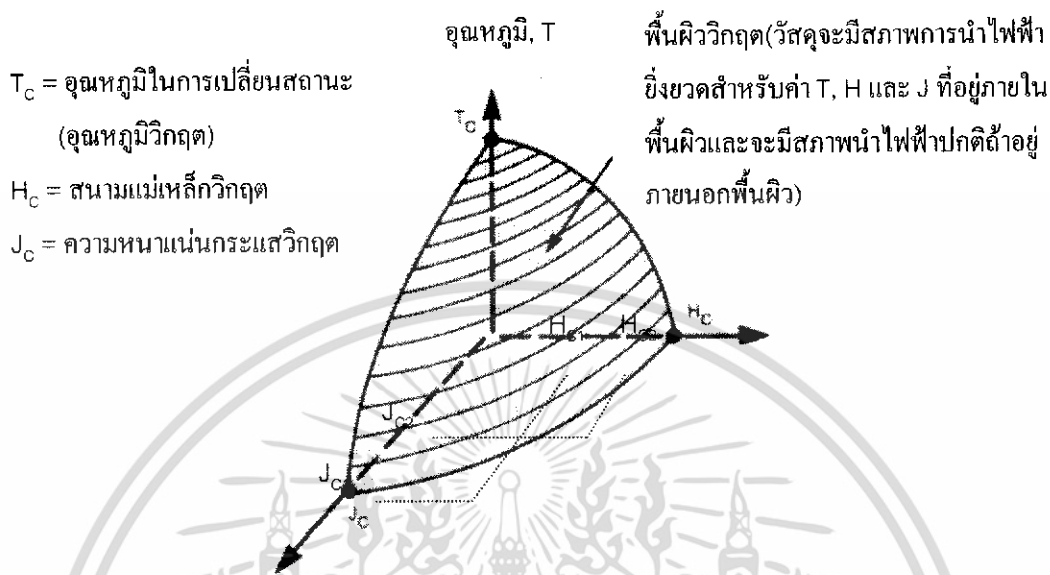
1.4 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำยิ่งยวด

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

1.4.1 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเป็นปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสาร หรือมีความต้านทานเกิดขึ้น เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current: I_c)

โดยทั่วไปการพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น มักพิจารณาในรูปของความหนาแน่นวิกฤต (Critical Current Density; J_c) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.3 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น H_1 ค่า J_c จะมีขนาดลดลงเป็น J_{c1} และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น H_2 ค่า J_c ก็จะลดลงเหลือ J_{c2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.4.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

1.4.3 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{3}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

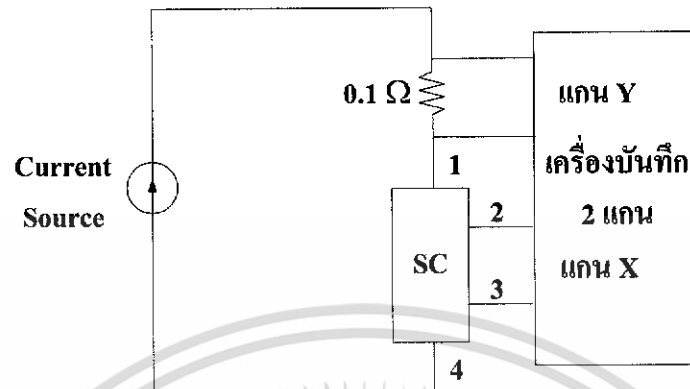
หนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชิ้นสารที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95$ K ก็สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ T_c มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่วงการทางวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริงต่อไป

1.5 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

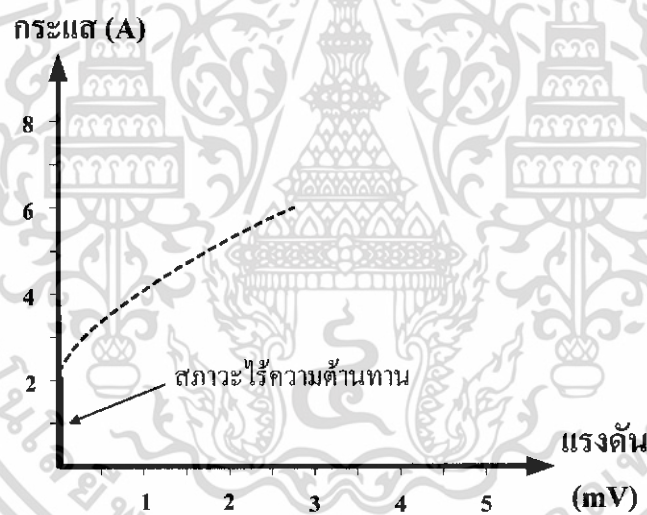
ปรากฏการณ์สำคัญที่แสดงถึงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุหรือสารต่างๆ ได้แก่ ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) และปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

1.5.1 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชิ้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสารได้ถูกแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 K จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.5.2 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามักเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง นั่นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้น

แรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่ง
เป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) รูปที่ 1.6 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่ง
เกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K จาก
คุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.1)$$

โดยที่ $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ (1.2)

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \quad (1.3)$$

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

χ_m คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

μ_0 คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

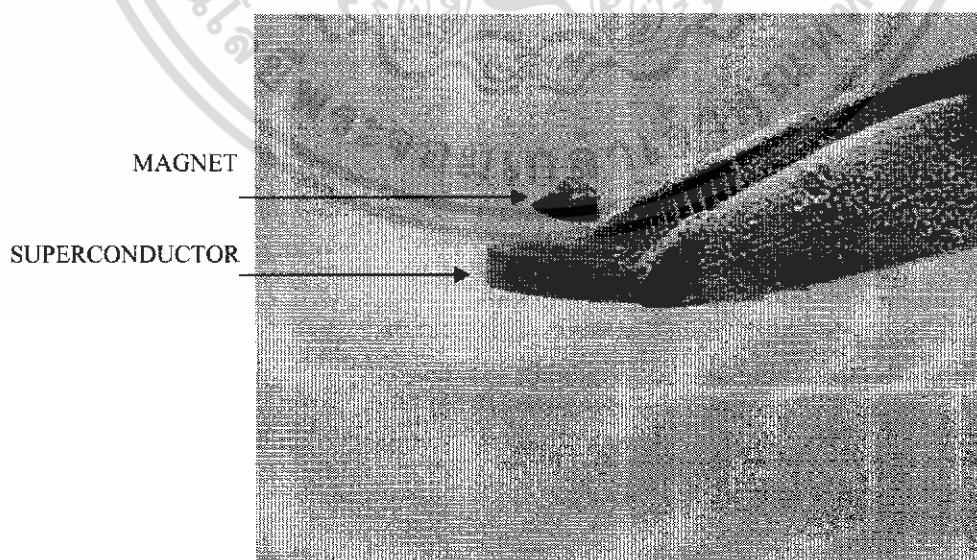
μ_r คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (1.4)$$

$$\chi_m = -1 \quad (1.5)$$

$$\mu_r = 0 \quad (1.6)$$



รูปที่ 1.6 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วขึ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A.}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมขั้วขึ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วขึ้นสารเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.6 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

1.6.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพนำไฟฟ้าที่ยาววิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับขั้วขึ้นสารจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต $H_c(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวได้ ที่อุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $H_c(T_c) = 0$ สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

เมื่อ	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a = 0$	เป็นสถานะนำไฟฟ้าที่ยาว
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_c > H_a > 0$	เป็นสถานะนำไฟฟ้าที่ยาว
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a > H_c$	เสียสภาพนำไฟฟ้าที่ยาว

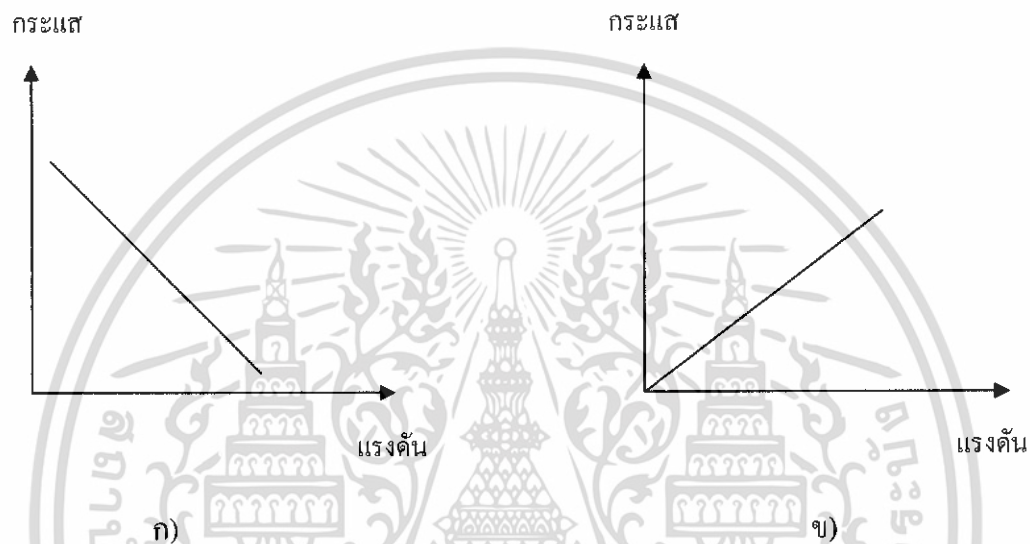
จะเห็นได้ว่าในขณะที่ $T = T_c$ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวได้ ($T = T_c$ ได้ $H_c = 0$) แต่ถ้า $T \ll T_c$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามากๆ จึงจะทำลายได้ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

เมื่อ	$H_c(T)$	= สนามแม่เหล็กวิกฤต
	$H_c(0)$	= สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

1.7 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.7



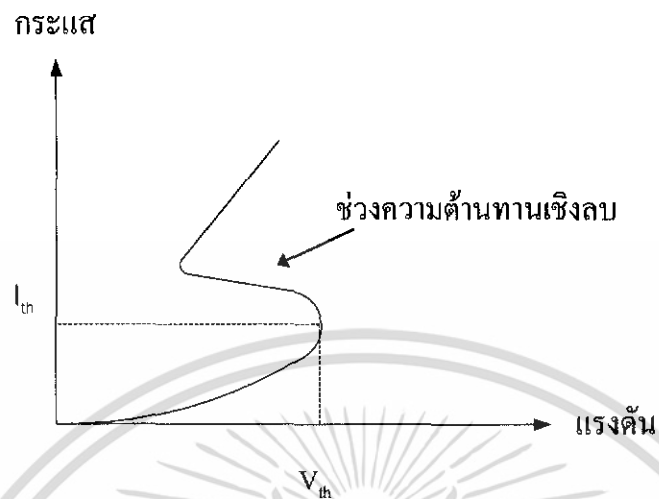
รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

1.7.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.7.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

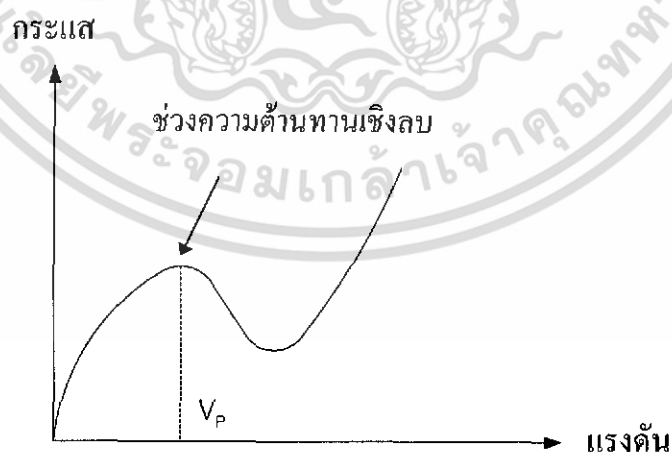
ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรตัว S ดังรูปที่ 1.8 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้ สามารถเกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤต I_{th} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current controlled negative resistance (CCNR) ซึ่งจะพบในอุปกรณ์ดังนี้ Silicon-Controlled-rectifier (SCR), Uni-Junction Transistor (UJT) เป็นต้น



รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

1.7.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับตัวอักษรตัว N ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage controlled negative resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode เป็นต้น



รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวคนั้นมีความสามารถเหนือกว่าตัวนำธรรมดา 3 ข้อ ได้แก่

1. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่มีความต้านทานไฟฟ้าหรือความต้านทานเป็นศูนย์
2. ไม่มีผลของความร้อนเนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย
3. ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่าน โดยจะประพุดิตัวเหมือนกับ diamagnet

ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงได้รับความสนใจอย่างมาก ในการที่จะประยุกต์นำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงมาใช้งานด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์หรืองานด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างที่พอจะเห็นได้ในตอนนี้ได้แก่

1.8.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์น่าจะมีความเกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาก เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะพวกวงจรรวม ซึ่งมักจะเป็นวงจรรสำเร็จในตัวเดียว ซึ่งได้เปรียบในการใช้งานเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ขนาดใหญ่ๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวมนั้น ขั้นตอนทั้งสวดลายและการได้ชิพที่ทำการบรรจุลงบนตัวถัง การต่อขาโดยใช้ลวดโลหะเชื่อมต่อกับวงจรรวมยังขาดภายนอก ความร้อนนับเป็นสิ่งที่สำคัญต่อวงจรรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรรวมที่มีรายละเอียดมากๆ ความร้อนนั้นจะเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรรวมขณะวงจรรวมทำงาน ดังนั้นในการออกแบบผู้ออกแบบวงจรรวมจึงต้องมีการเว้นระยะห่างของตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีที่พอที่จะกระจายความร้อน ทำให้ต้องเสียพื้นที่ในส่วนนี้ไป แต่ในกรณีที่น่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้งานในวงจรรวม จะไม่เกิดปัญหาของความร้อนตัวอุปกรณ์ในวงจรรวมจึงสามารถออกแบบให้อยู่ใกล้กันได้มาก ซึ่งในกรณีนี้ยังช่วยลดเวลาของการส่งผ่านสัญญาณอีกด้วยและชิพจะมีขนาดลดลงอีกด้วย

การใช้งานอีกแบบหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในงานอิเล็กทรอนิกส์คือ รอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้งานในลักษณะของอุปกรณ์สวิทช์ซึ่ง ที่สามารถทำงานได้เร็วกว่าทรานซิสเตอร์ได้ เป็นร้อยเท่า ถ้านำมาใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมาก ขณะที่ขนาดเล็กลงอีก รอยต่อโจเซฟสันนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2505 โดย Brain Josephson รอยต่อโจเซฟสัน ประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ส่วนที่ถูกแยกด้วยชั้นกั้นฉนวนบางๆ เราใช้การเปลี่ยนแปลงของกระแสในกรณีที่ใช้รอยต่อโจเซฟสันเป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิทช์ โดยรอยต่อโจเซฟสันมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้คือ

1. ความเร็วในการสวิตช์จาก Zero Resistance ไปเป็น Positive Resistance ประมาณ $1/10^{12}$ ของวินาที
2. สามารถควบคุมด้วยอุปกรณ์กำลังต่ำๆ ได้ เพราะเป็นการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กและรอยต่อเองมีการสูญเสียกำลังต่ำมาก
3. สามารถนำไปเป็นหน่วยความจำของระบบการประมวลผลต่างๆ ได้เพราะคุณสมบัติที่
 - ไม่มี voltage drop function เมื่อเป็นสภาพตัวนำยิ่งยวด
 - มี voltage drop function เมื่อเสียสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปัจจุบันได้มีการนำไปทดลองใช้เป็นวงจรร OR, AND gate โดยสร้างเป็น array of Josephson Cell ที่ Data ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็ก และนำไปสร้างเป็น oscilloscope ทำให้ bandwidth สูง

1.8.2 งานด้านระบบกำลัง

ระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งเริ่มจากเครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่ภาคจ่ายกำลังผ่านเครือข่ายไปสู่ผู้บริโภคนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายและพลังงานไปได้มากเมื่อนำสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานแทนระบบทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่

เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ให้กระแสเท่ากับที่ให้กับตัวนำธรรมดา จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่าและทำงานน้อยกว่ากระแสที่ผลิตได้จะถูกจ่ายออกไปตามโครงข่ายที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหลัก ทำให้ความสูญเสียลดลงจากระบบปกติซึ่งจะต้องสูญเสียไปประมาณ 20% ของไฟฟ้าที่ส่งเข้าไปอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้น เมื่อพลังงานไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นมาครั้งหนึ่งๆ จะถูกส่งไปยังผู้บริโภคเท่าที่มันผลิตได้เป็นส่วนมาก

เนื่องจากปัจจุบันไม่มีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานจำนวนมากจึงจำเป็นต้องประมาณว่าผู้บริโภคจะใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณเท่าใด และปรับกำลังการผลิตให้เหมาะสมกับความต้องการตามการคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีที่ผู้บริโภคต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าปกติจะมีพลังงานบางส่วนเหลือ การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะช่วยแก้ปัญหาในส่วนนี้เพื่อลดการสูญเสีย ระบบ SMES หรือ Superconductor Magnetic Energy Storage ซึ่งเหมือนกับการทดลองของ Onnes ที่ได้เหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ลดลงเลยเมื่อเวลาผ่านไป เราจึงสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ยาวนาน ระบบ SMES จะถูกต่ออยู่กับโครงข่ายกำลังในช่วงเวลาที่ต้องการใช้ไฟฟ้าจำนวนน้อย พลังงานส่วนใหญ่มักจะถูกนำเข้าสู่อุปกรณ์ SMES และในระหว่างที่ปริมาณไฟฟ้ามีความต้องการอย่างมากกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในระบบ SMES จะกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเก็บและการกระจายพลังงานเท่านั้น สถานำนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังมีประโยชน์ในการพัฒนาระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน และเครื่องเป่าผม ในวันหนึ่งข้างหน้าอาจจะสร้างด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งใช้พลังงานน้อยลงและมีขนาดเล็กลงมาก

1.8.3 ด้านการคมนาคม

สถานำนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้กับงานคมนาคมได้หลายอย่าง แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถใช้กับรถไฟพิเศษที่วิ่งเหนือรางสามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วมาก มอเตอร์ตัวนำไฟฟ้าก็จะถูกนำไปใช้ในเรือและเรือดำน้ำ

รถไฟแมกเลฟ (Maglev Train) เป็นคำย่อของ Maneticallu Levitated เป็นรถไฟที่มีความเร็วสูงมาก มันจะลอยอยู่เหนือรางประมาณ 4 นิ้ว บนเบาะรองแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่มีความเสียดทานที่ล่อมาจำกัดความเร็ว รถไฟแมกเลฟใช้กฎแม่เหล็กธรรมดา คือ ขั้วของแม่เหล็กเหมือนกันผลักกัน ระบบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบ แม่เหล็กส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เพื่อยกตัวรถไฟและอีกส่วนหนึ่งใช้เพื่อการขับเคลื่อนทางทิศทางการที่ต้องการให้เคลื่อนที่ รถไฟแมกเลฟของญี่ปุ่นนั้น ได้ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำ ซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดอุปกรณ์ทำความเย็นที่หนักมากนี้ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงระยะหลังนี้ใช้ตัวทำความเย็นจากไนโตรเจนเหลวก็พอเพียงแต่ก็ยังมีคุณสมบัติบางอย่างที่จำกัด

1.8.4 ด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์

สาขาวิทยาศาสตร์และการแพทย์จะได้รับผลดีอย่างมากจากสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรง และการตรวจจับสนามแม่เหล็กอ่อนๆ

นักฟิสิกส์นั้นได้ใช้ประโยชน์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายิ่งยวดมานานแล้วสำหรับใช้กำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรงเพื่อศึกษาการชนของอะตอมในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ นักฟิสิกส์ได้พยายามสร้าง magnetic bottle เพื่อเก็บปฏิกิริยาฟิวชันโดยใช้แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยหวังว่าในอนาคตอันใกล้นี้จะสามารถเก็บปฏิกิริยาฟิวชันได้

สควิดส์ (SQUIDS) เป็นชื่อย่อของ Superconduction Quantum Interference Device สควิดส์ประกอบด้วย รอยต่อโจเซฟสันเป็นชั้นแบบแซนวิชของฉนวนชั้นบางได้ตามขบวนการที่เรียกว่า Tunneling ถ้าสควิดส์นี้ถูกวางไว้ในสนามแม่เหล็ก แรงดันของกระแสที่ไหลผ่านตัวมันจะเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก สควิดส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงสำหรับการวัดค่าสนามแม่เหล็ก สควิดส์จึงมักถูกอ้างถึงบ่อยๆ เช่นในแมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer)

เมื่อเร็วนี้บริษัท IBM ได้ทดลองสร้างโดยใช้วัสดุการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง ประกอบด้วยรอยต่อ Thin-film โจเซฟสัน 2 ชั้น มีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ 64 K โดยใช้ไนโตรเจนเหลวที่ลดแรงดันลงแล้วเป็นตัวหล่อเย็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

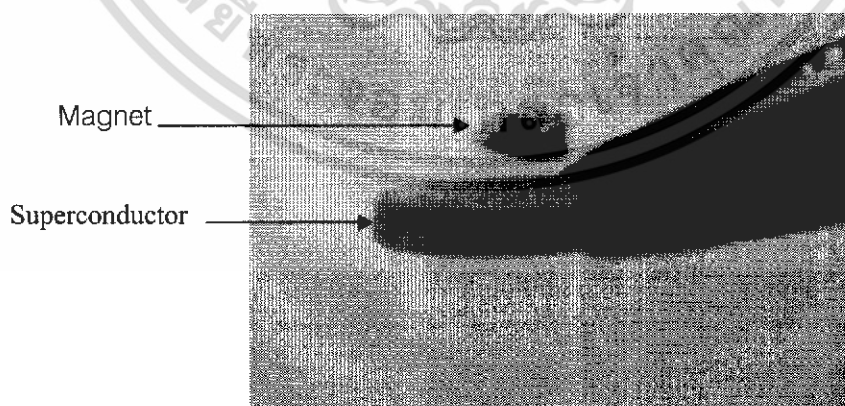
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโลหะสารกึ่งตัวนำและสารประกอบต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นศูนย์ทันที อุณหภูมิที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นศูนย์หรือเกิดการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature) และสารที่มีการเปลี่ยนสถานะ เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor)

2.1 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

เป็นการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีดังนี้

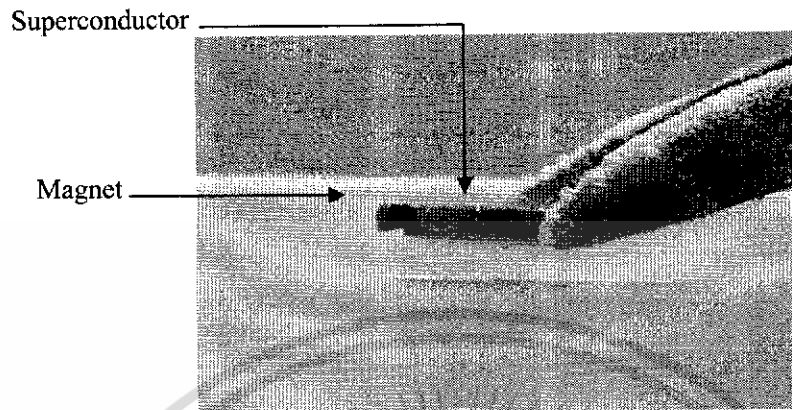
2.1.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเมื่อดสารว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว(77 K) ถ้าเม็ดสารมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด 73183 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

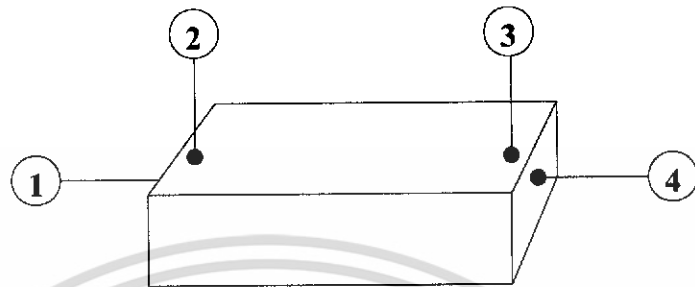
เมื่อดำเนินการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current) ดังรูปที่ 2.1 ก) และที่น่าสนใจก็คือบริเวณขอบของเมื่อดำเนินการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ข) การที่บางส่วนของเมื่อดำเนินการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกดโกลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก

2.1.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

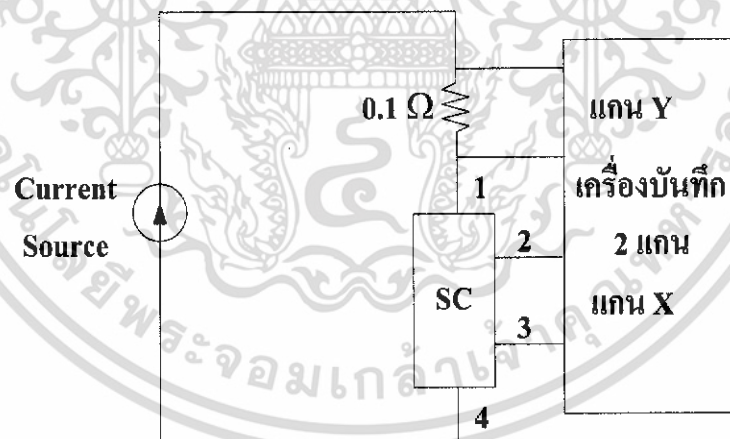
ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเมื่อดำเนินการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเมื่อดำเนินการให้มีรูปทรงดังรูป 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



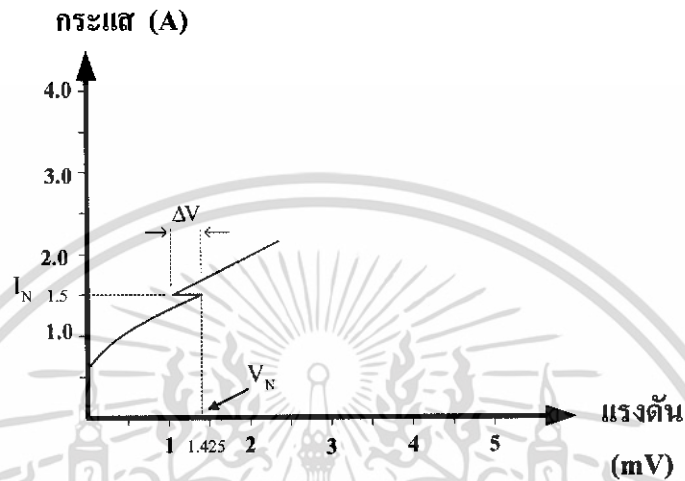
รูปที่ 2.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวดัดผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

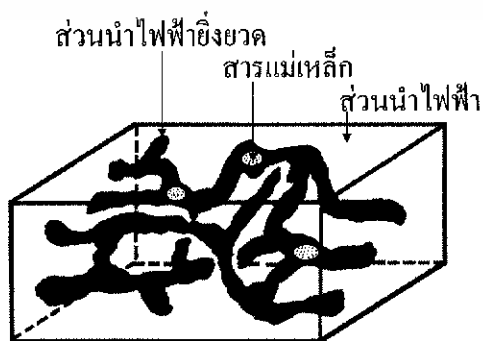
ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

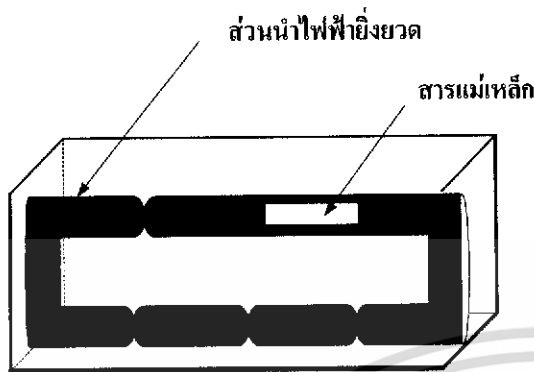
ในรูปที่ 2.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส (I_N) เท่ากับ 1.5 A และที่แรงดัน (V_N) เท่ากับ 1.425 mV ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) เท่ากับ 0.25 mV และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ S

2.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 2.5 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



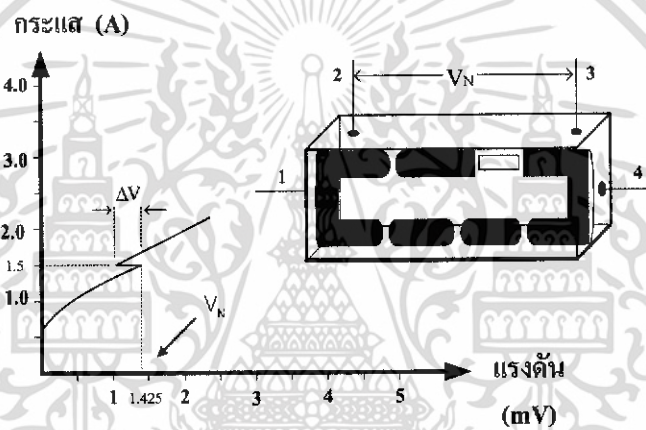
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่าย
ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด
Gd-Ba-Cu-O

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้น มีลักษณะเนื้อสารเป็นเซรามิก และจากการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ทำให้เราได้ทราบว่า มีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในเนื้อสาร ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแกดโดลิเนียม จากแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O พิจารณาได้ว่า ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การที่เนื้อสารสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น หมายความว่า จะต้องมีการเชื่อมต่อกันอย่างแน่นแฟ้น และการเชื่อมต่อกันอยู่อย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเชื่อมต่อจะไม่สม่ำเสมอ คือมีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็ง และการเชื่อมต่ออย่างหลวม หรือที่เรียกว่า จุดคอด ซึ่งเกิดจากการอัดผงสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้สารเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ยังมีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในอีกด้วย ดังรูปที่ 2.5 แต่เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ จะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งในส่วนของท่อด้านล่าง จะมีบริเวณจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อบนมีบริเวณจุดคอด 1 จุดและมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในท่อทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.6 ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเสียดสภาพได้นั้น เกิดจากส่วนที่เป็นท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออก และบริเวณที่ขาดง่ายที่สุดคือ บริเวณส่วนของจุดคอด ในส่วนของท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณมากพอ ในส่วนนี้ก็จะขาดออกและขาดเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กที่อยู่ภายในท่อมีขนาดใหญ่

2.2.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้า

จากกราฟในรูปที่ 2.7 พบว่ากระแสวิกฤตมีค่าเท่ากับ 0.55 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขณะที่กระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ปริมาณน้อยกว่า 0.55 A บริเวณจุดคอดทั้งหมดยังเชื่อมต่อกันอยู่ จึงไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร แต่เมื่อกระแสไหลผ่านเกินกว่า 0.55 A จะทำให้จุดคอดขาดออกจากกันทั้งหมด สาเหตุที่ทำให้จุดคอดขาดออกจากกัน เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเอกสารถูกเป็นเอกสารถูกที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้นบริเวณจุดขาดและมีแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้นแต่เนื่องจาก ส่วนของจุดขาดด้านบนขนาดเป็นปริมาณน้อยกว่าส่วนขาดของจุดขาดด้านล่างมาก จึงทำให้ กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในขณะนี้ไหลผ่านท่อด้านบน ในสถานะนี้เราจะพิจารณาแรงดันที่ตก คร่อมขึ้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านบนเป็นหลักและเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ มีผล ทำให้จุดขาดทั้งด้านบนและล่างขยายตัวมากขึ้นแรงดันจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเมื่อเราป้อน กระแสถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้ายังยวดในส่วนที่มีสารแม่เหล็กขาดออกจาก กันเป็นบริเวณกว้าง



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เมื่อเทียบกับจุดขาด ทำให้ความต้านทานที่ท่อด้านบนมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าที่ไหล เข้ามายังขึ้นสารจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดัน ที่ตกคร่อมขึ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วถึงค่าหนึ่งจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความ ต้านทานเชิงลบ” แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของความต้านทานเชิงลบที่ได้นั้นมีขนาดเล็ก เนื่องจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างท่อบนและล่างมีไม่มาก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่ม สูงขึ้นอีก แรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากจุดขาดขยายตัวนั่นเอง

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่เตรียมขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีเครื่องมือที่สร้างขึ้นใช้เพื่อเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบเซรามิกและเครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติต่างๆของสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของตัวอย่างที่ได้สร้างขึ้น

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1. เครื่องชั่ง 2 แขน
2. กรกบดสาร
3. ถ้วยเผาทนความร้อน
4. ซ้อนตักสารและกระดาดพาราฟิล
5. อุปกรณ์จำเป็นอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์สำหรับล้างทำความสะอาด ปีกเกอร์ กระดาษฟรอยด์ กระเบื้องเซรามิกทนความร้อน เป็นต้น

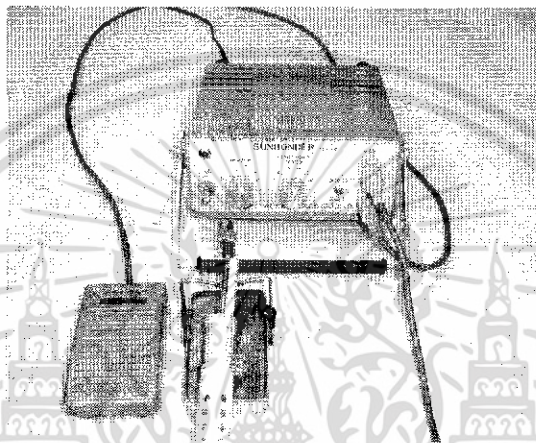


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก

เป็นชุดที่ใช้บัคกรีชั่วคราวขึ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดย โดยที่ตะกั่วบัคกรีจะมีส่วนผสมของอินเดียม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ในส่วนของชุดบัคกรีอัลตราโซนิกจะมีการสั่นของหัวบัคกรี ซึ่งจะช่วยให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัคกรีและชิ้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก



รูปที่ 3.2 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก

3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance and Temperature control)

เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยเป็นเตาเผาชนิดควบคุมความร้อนที่สามารถให้ความร้อนได้จนถึง 1050 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยจะประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ

- ตัวเตาเผาชนิดควบคุมความร้อน เป็นเตาเผาขนาดเล็กที่ใช้ควบคุมความร้อนแบบ VTR-E ลักษณะเตาเป็นทรงกระบอก ประกอบด้วย เป้าเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบชนิดควบคุมความร้อนนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220V ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ
- หัววัดอุณหภูมิเตา หัววัดอุณหภูมิ ประกอบด้วยหลอดเซรามิกทนความร้อนสำหรับใส่หัววัดเข้าไปในเตาเผา และหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K- Type, Chromel-Alumel)

ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ต่อร่วมกับเตาเผาจะเป็นชุดควบคุมอุณหภูมิ Electronic Temperature Controller ซึ่งใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0- 1200 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของเตาให้คงที่ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Controller ไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัด-ต่อ ไฟเลี้ยงขอลดความร้อนของเตาเผา ความผิดพลาดของอุณหภูมิของเตาเผาประมาณไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส

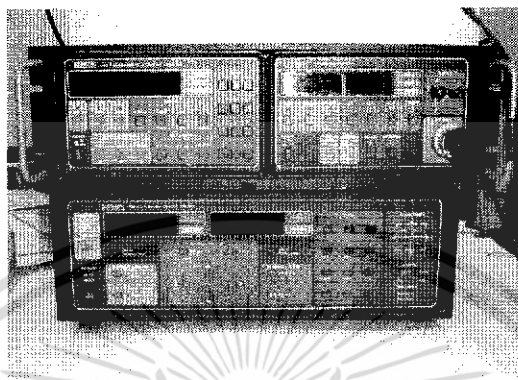


รูปที่ 3.3เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเป็นการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ซึ่งชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วยแกดโดลิเนียมออกไซด์(Gd_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

ชื่อสาร	ความบริสุทธิ์ของสาร	มวลโมเลกุล (กรัม)
(Gd_2O_3)	99.99%	362.49 กรัม
($BaCO_3$)	99.99%	197.348 กรัม
(CuO)	99.99%	79.545 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลโคลิเนียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลโคลิเนียม ออกไซด์ (Gd_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.1 พบว่า อัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้ Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 จากตารางธาตุ จะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ Gd = 157.26 กรัม , Ba = 137.34 กรัม , Cu = 63.54 กรัม , O = 15.99 กรัม มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$Gd_2O_3 = (2 \times 157.26) + (3 \times 15.99) = 362.49 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$BaCO_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.99) = 197.348 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545 \text{ กรัมต่อโมล}$$

การคำนวณจากสมการเคมี

$$1) Gd_2O_3 \quad 1 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 362.49 \text{ กรัม}$$

$$\quad \text{ถ้า} \quad \frac{1}{2} \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 181.245 \text{ กรัม}$$

$$2) BaCO_3 \quad 1 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 197.348 \text{ กรัม}$$

$$\quad \text{ถ้า} \quad 2 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 394.696 \text{ กรัม}$$

$$3) CuO \quad 1 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 79.545 \text{ กรัม}$$

$$\quad \text{ถ้า} \quad 3 \quad \text{โมล} \quad \text{ต้องเตรียมสาร} = 238.635 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} &= 181.245 + 394.696 + 238.635 \\ &= 814.576 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ซึ่งหมายความว่าจะได้สาร $GdBa_2Cu_3O_{7-x} = 814.576 \text{ กรัม}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

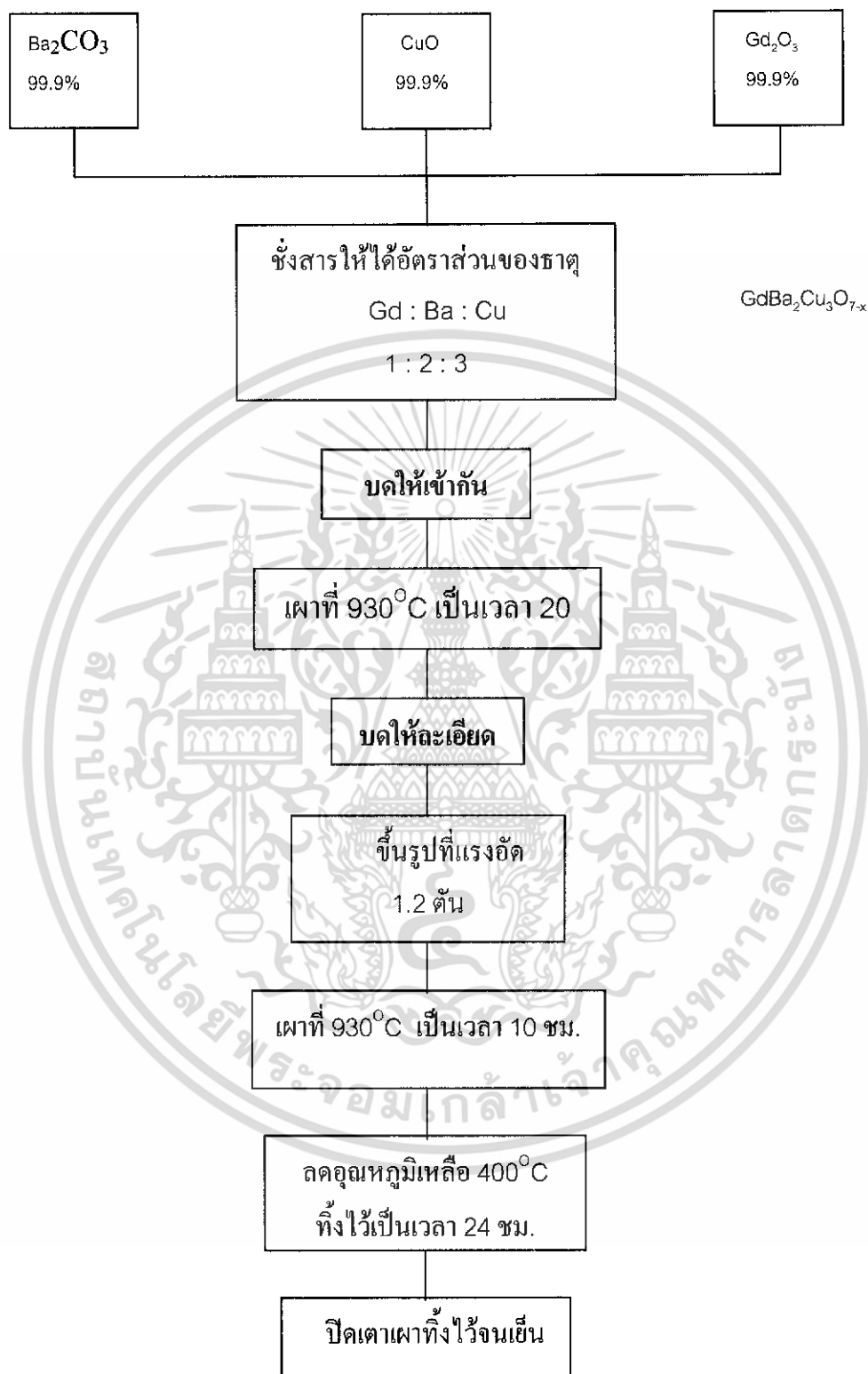
จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

3.2.3 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนี้เป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , BaCO_3 และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $\text{Gd} : \text{Ba} : \text{Cu}$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930°C ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 930°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400°C อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



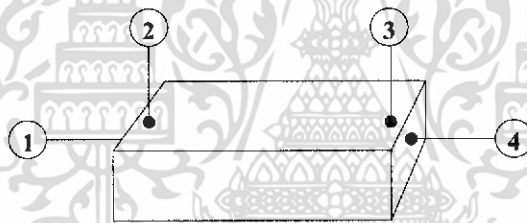
รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

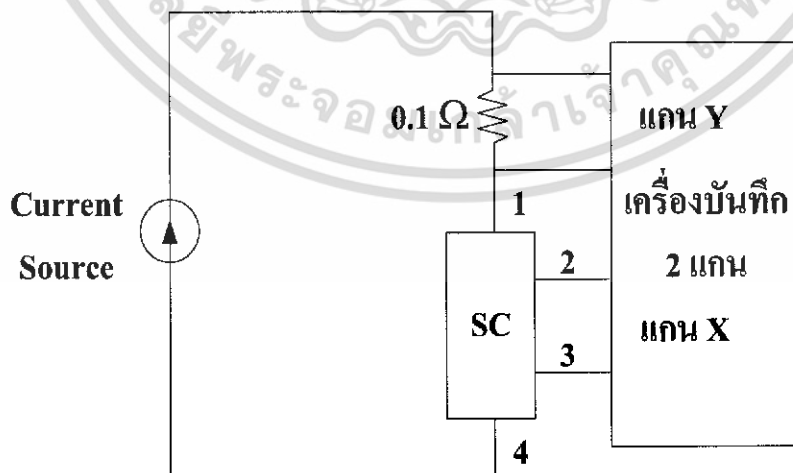
3.2.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.7 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสารโดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.6



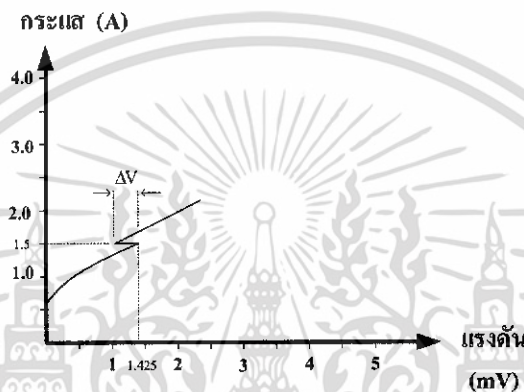
รูปที่ 3.6 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

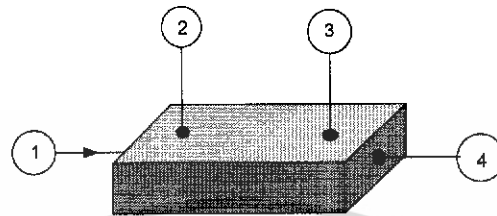


รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

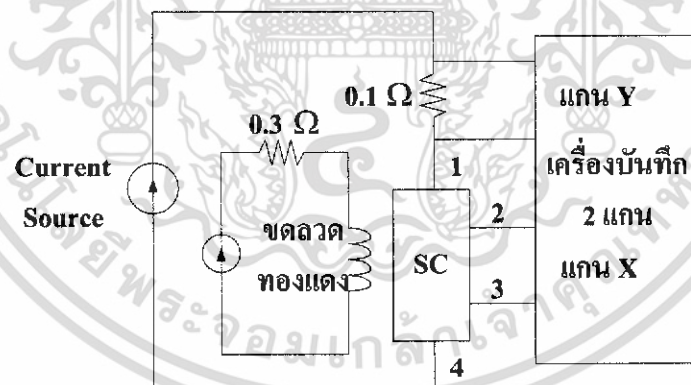
3.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ในการทดลองเริ่มโดยการจัดเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ในการทดลองจะทำการต่อขั้วไฟฟ้าออกมา 4 ขั้ว โดยที่ขั้วไฟฟ้าคู่ 1-4 ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าและออกชิ้นสาร ส่วนขั้วไฟฟ้าคู่ 2-3 ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากนั้นนำชิ้นสารดังกล่าวมาทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.10 ในขณะทดลองได้ให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดแก่ชิ้นสารค่าต่างๆดังนี้ $B = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40$ และ 60 a.u. (1a.u. เทียบได้กับกระแสที่ป้อนให้กับขดลวด 1 mA) ในการทดลองชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

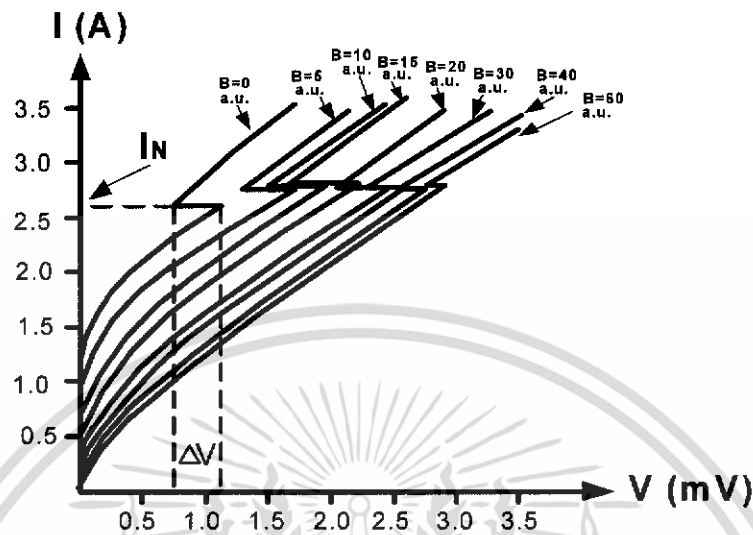


รูปที่ 3.9 รูปทรงของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง



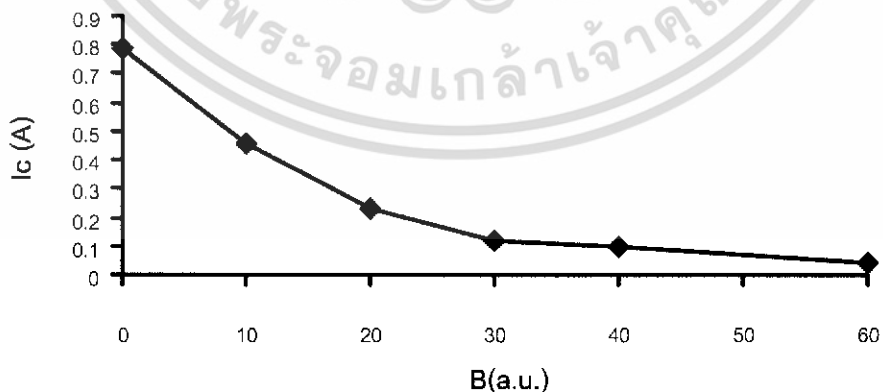
รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



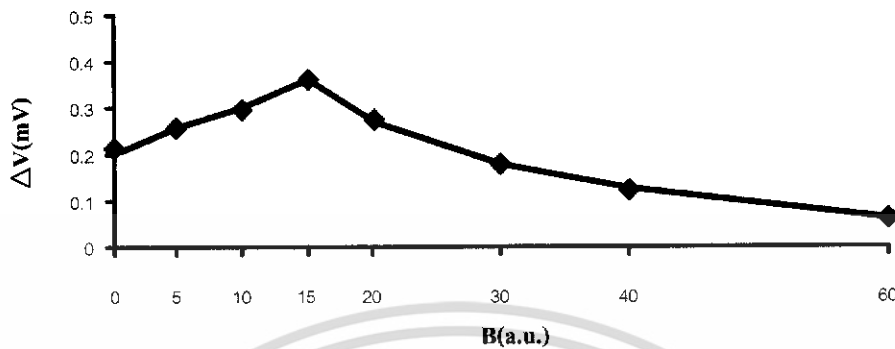
รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารมากขึ้นจะทำให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลงและในขณะเดียวกันเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารถึงค่าหนึ่งขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) จะมีค่ามากที่สุด ต่อมาเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารมากขึ้นขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) จะมีค่าลดลง ซึ่งพิจารณาได้จากกราฟในรูปที่ 3.12 และ 3.13



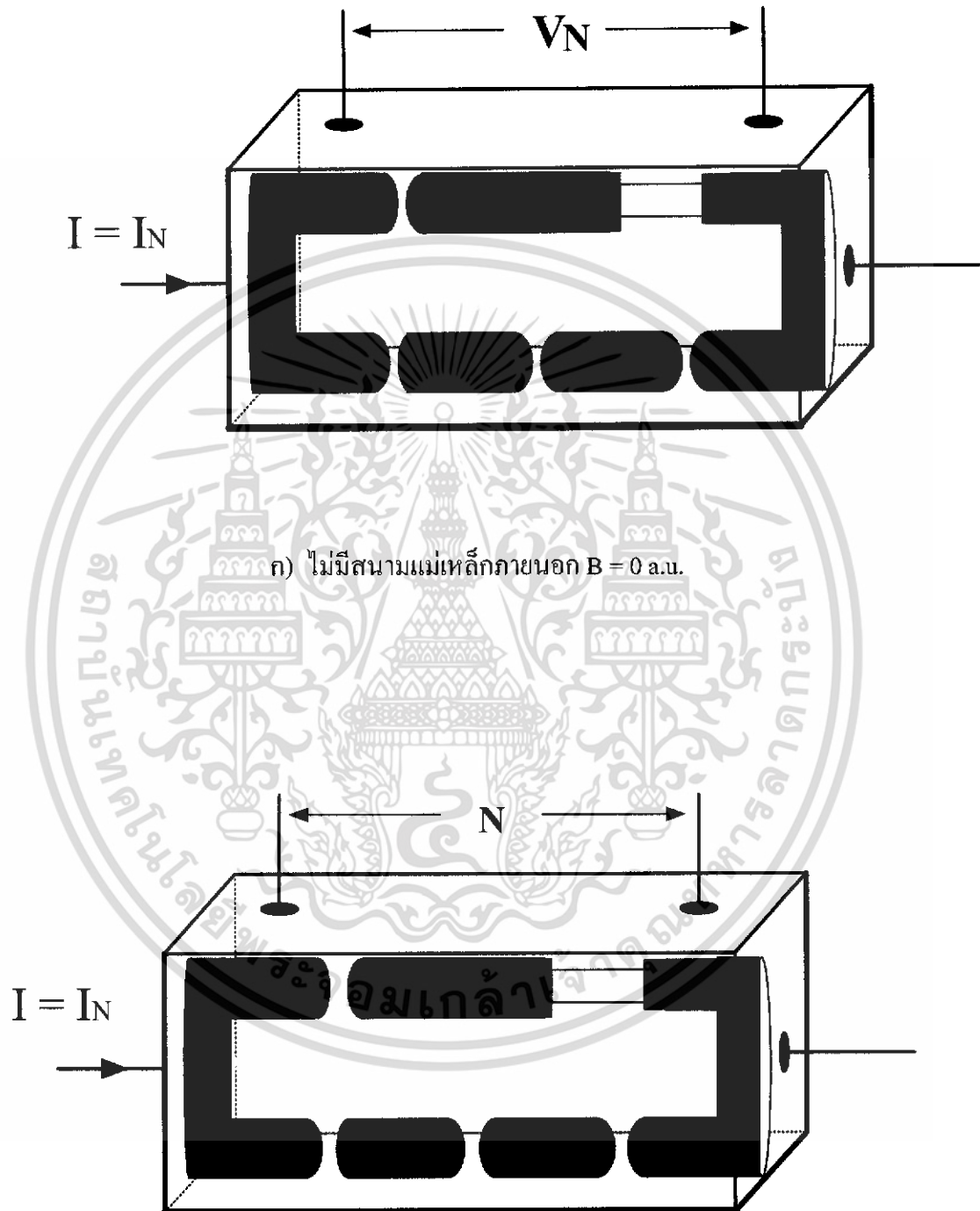
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับปริมาณสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



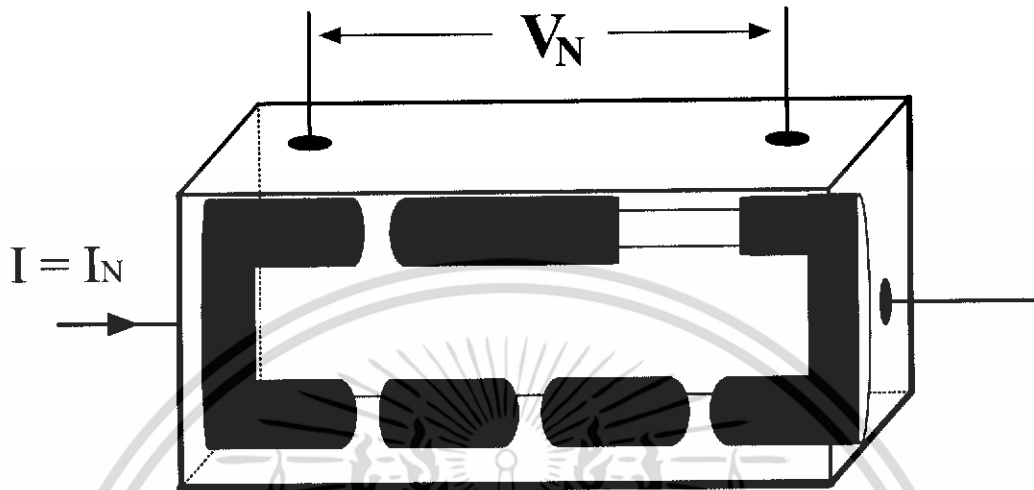
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน
ขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้โดยสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ดังนี้ พิจารณารูปที่ 3.14 ก) เป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ในขณะที่ป้อนกระแสต่ำกว่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันตลอดทั้งชั้นสาร เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้ามากกว่ากระแสวิกฤตจุดคอดจะขาดออกทำให้เกิดความต้านทานขึ้น ชั้นสารจึงเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากรูปจะพบว่าส่วนขาดของท่อด้านบนมีปริมาณน้อยกว่าท่อด้านล่าง ดังนั้นกระแสที่ไหลเข้ามาในชั้นสารจึงไหลผ่านท่อด้านบนเป็นหลัก แรงดันตกคร่อมชั้นสารขณะนี้เป็นแรงดันที่ตกคร่อมท่อด้านบน เมื่อป้อนกระแสเพิ่มมากขึ้นส่วนขาดจะขยายขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กเข้าไปทำลายท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเมื่อป้อนกระแสถึงค่าหนึ่ง (I_N) จะทำให้ท่อตัวนำด้านบนบริเวณที่มีสารแม่เหล็กขาดออกอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่วนขาดของท่อด้านบนมีปริมาณมากกว่าส่วนขาดของท่อด้านล่าง กระแสที่ไหลเข้ามาในชั้นสารจึงไหลผ่านท่อด้านล่างซึ่งมีปริมาณส่วนขาดน้อยกว่าทำให้แรงดันลดลง และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่วนขาดจะขยายมากขึ้นทำให้แรงดันตกคร่อมชั้นสารมากขึ้น

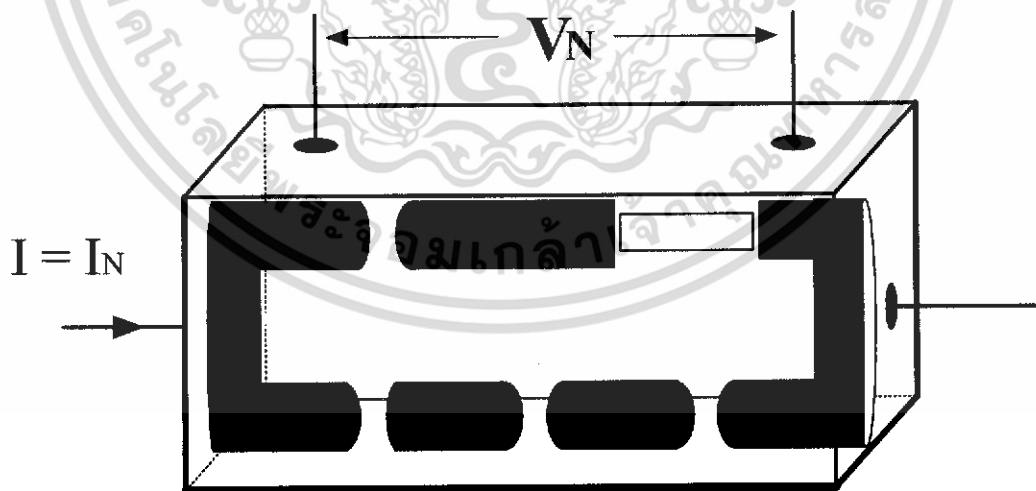


ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 5$ a.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

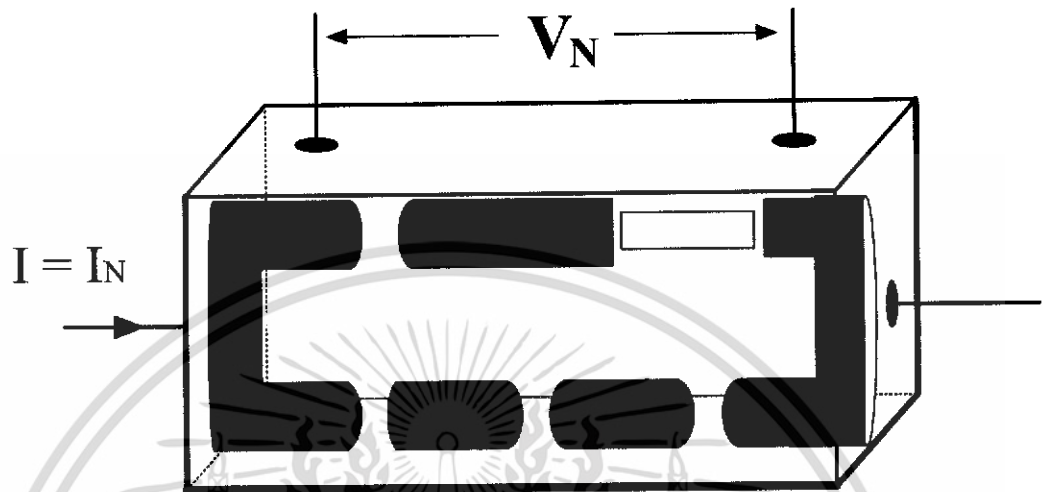


ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 10 \text{ a.u.}$

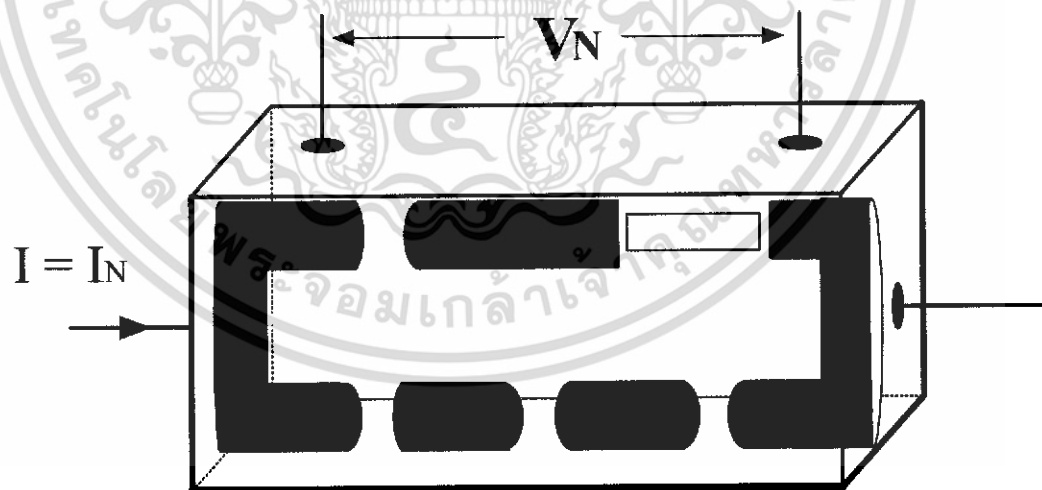


ง) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 15 \text{ a.u.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

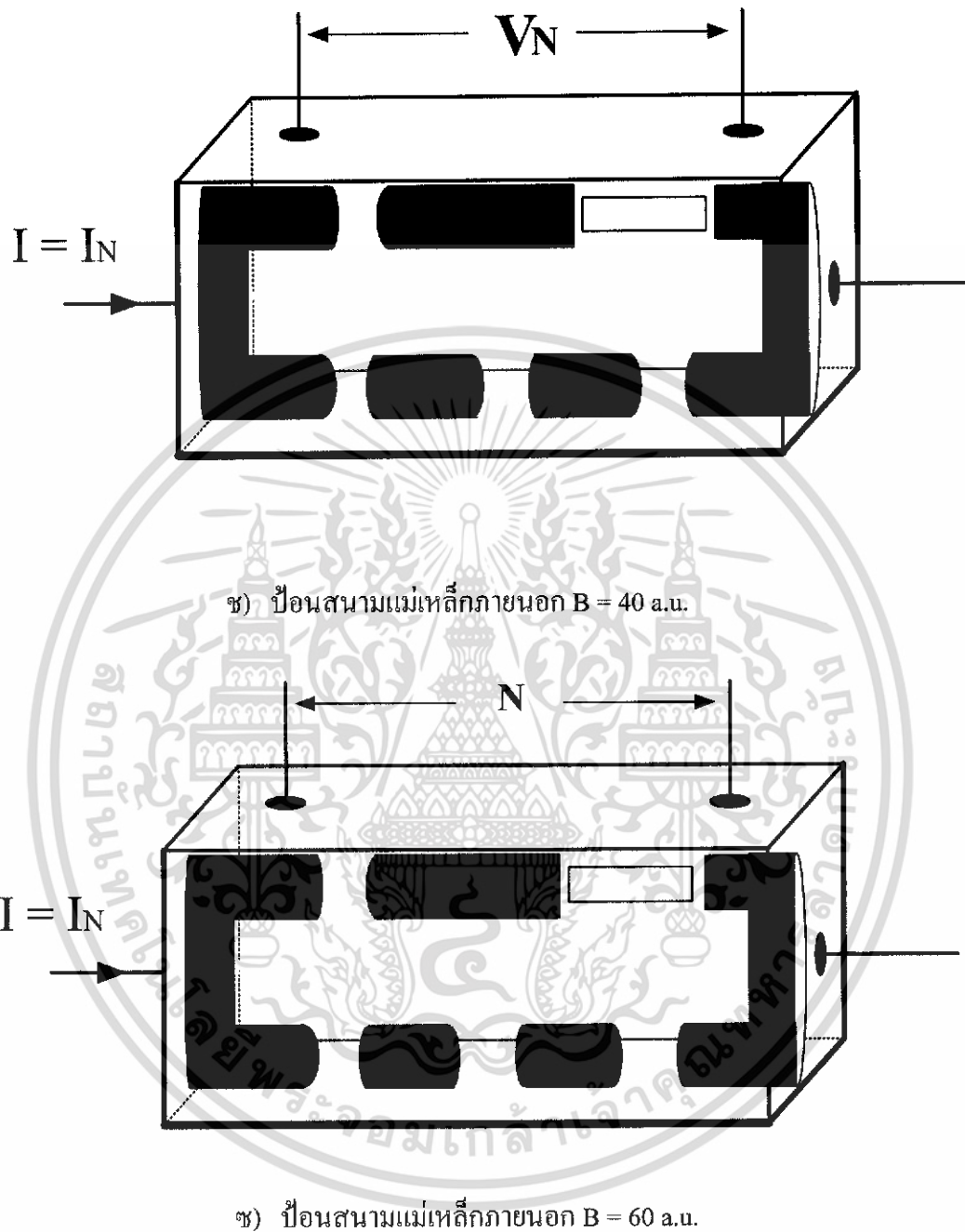


จ) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 20$ a.u.



ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 30$ a.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 สมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

ที่อุณหภูมิกิรเผา 930 องศาเซลเซียส

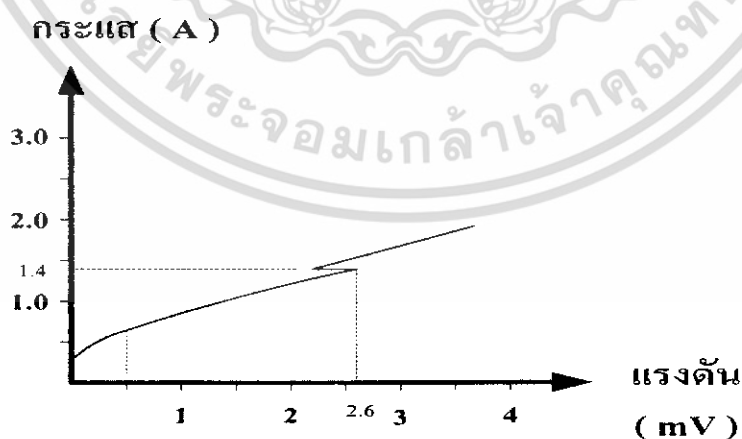
จากรูปที่ 3.14 ง) ขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 15 \text{ a.u.}$ ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค โดยขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะเห็นได้ว่าในส่วนจุดคอดด้านล่างขาดออกจากกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่ขาดด้านบน ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลลงมายังท่อตัวนำด้านล่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอตเห็นาเปไซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารในขณะนี้จะยิ่งมีค่าลดลงจากเดิมมาก ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมาก

เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 20, 30, 40 และ 60 a.u. ทำให้กระแสวิกฤตและปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบลดลงตามลำดับ จากรูปที่ 3.14 จ-ข) จะเห็นว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น ขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ปริมาณส่วนที่ขาดของท่อตัวนำด้านล่างกับส่วนที่ขาดด้านบนมีความแตกต่างกันน้อยลง ผลต่างของแรงดันจึงมีไม่มาก ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (ΔV) ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบจึงน้อยลง

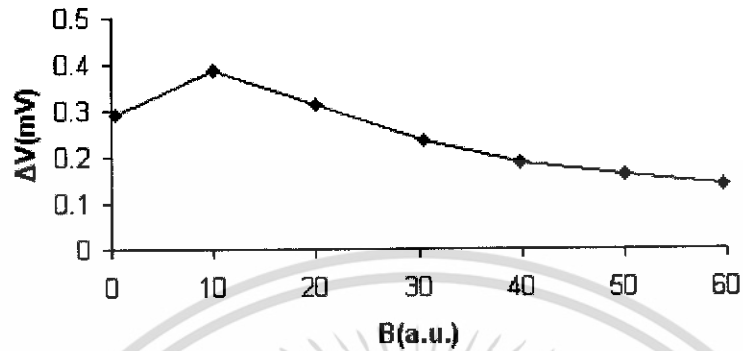
เมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้น กระแสวิกฤต (I_C) จะมีค่าลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กเข้าไปทำลายส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้เสียสภาพได้ง่าย จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า จุดคอคอดจะขาดและขยายตัวออกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมมากขึ้น ท่อตัวนำด้านบนในส่วนที่มีสารแม่เหล็กจะขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้าง กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังชิ้นสารจึงไหลลงมายังท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานที่ต่ำกว่าแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารจึงลดลงแต่ไม่มากเป็นเหตุให้ค่ากระแสวิกฤต (I_C) มีค่าลดลง

ผลการทดลองที่อุณหภูมิกะลา 950 องศาเซลเซียส



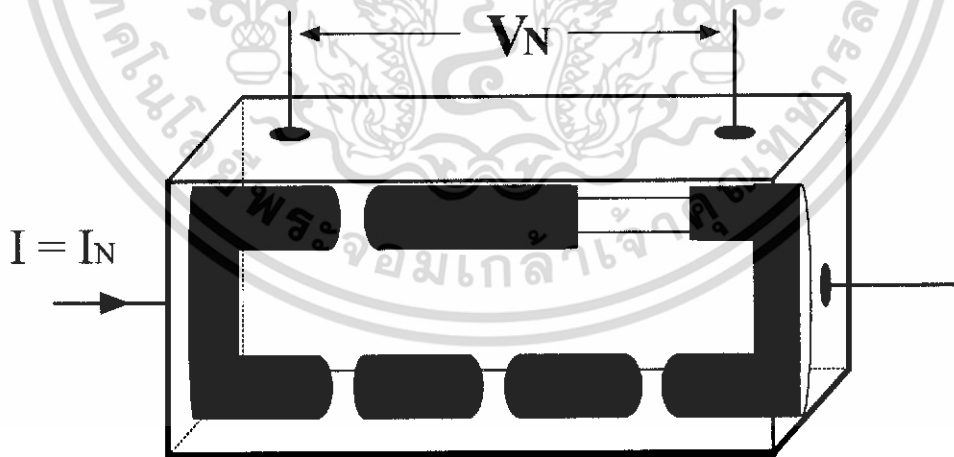
รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกะลา 950 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



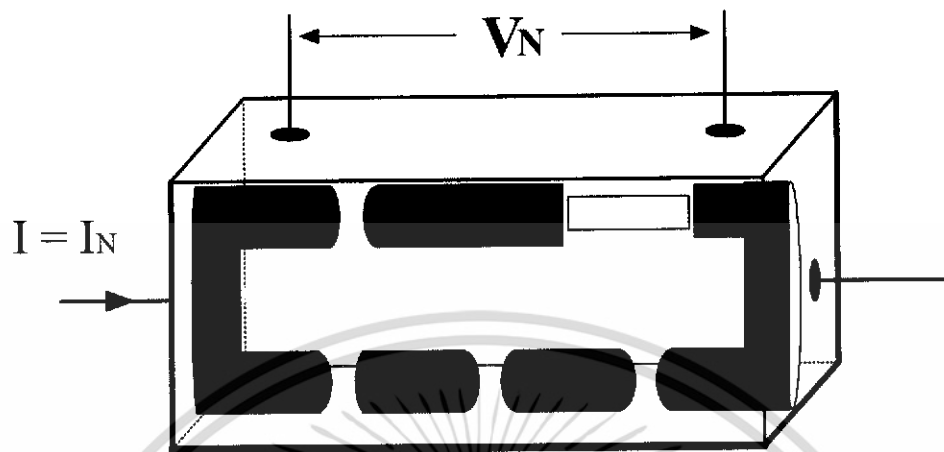
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ที่อุณหภูมิกำหนด 950 องศาเซลเซียส

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของสารตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิกำหนด 950 องศาเซลเซียส

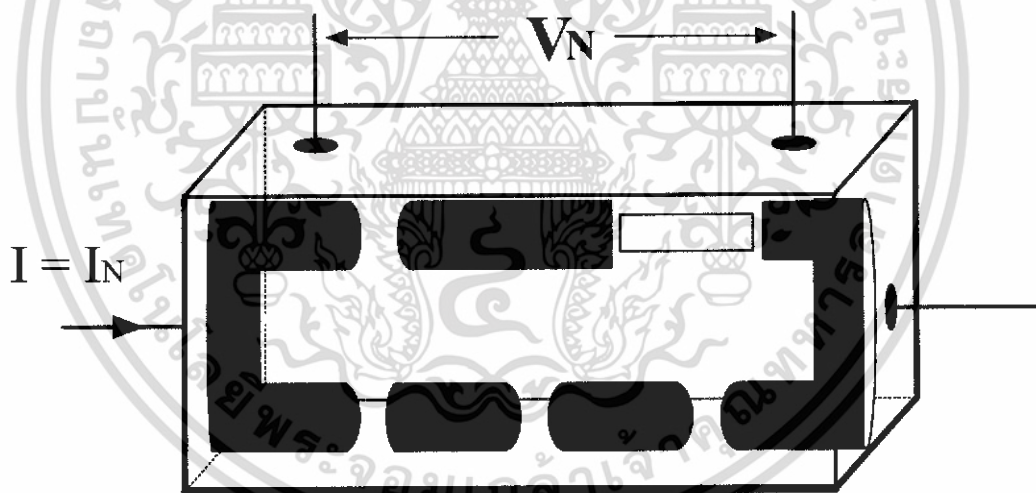


ก) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 0$ a.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

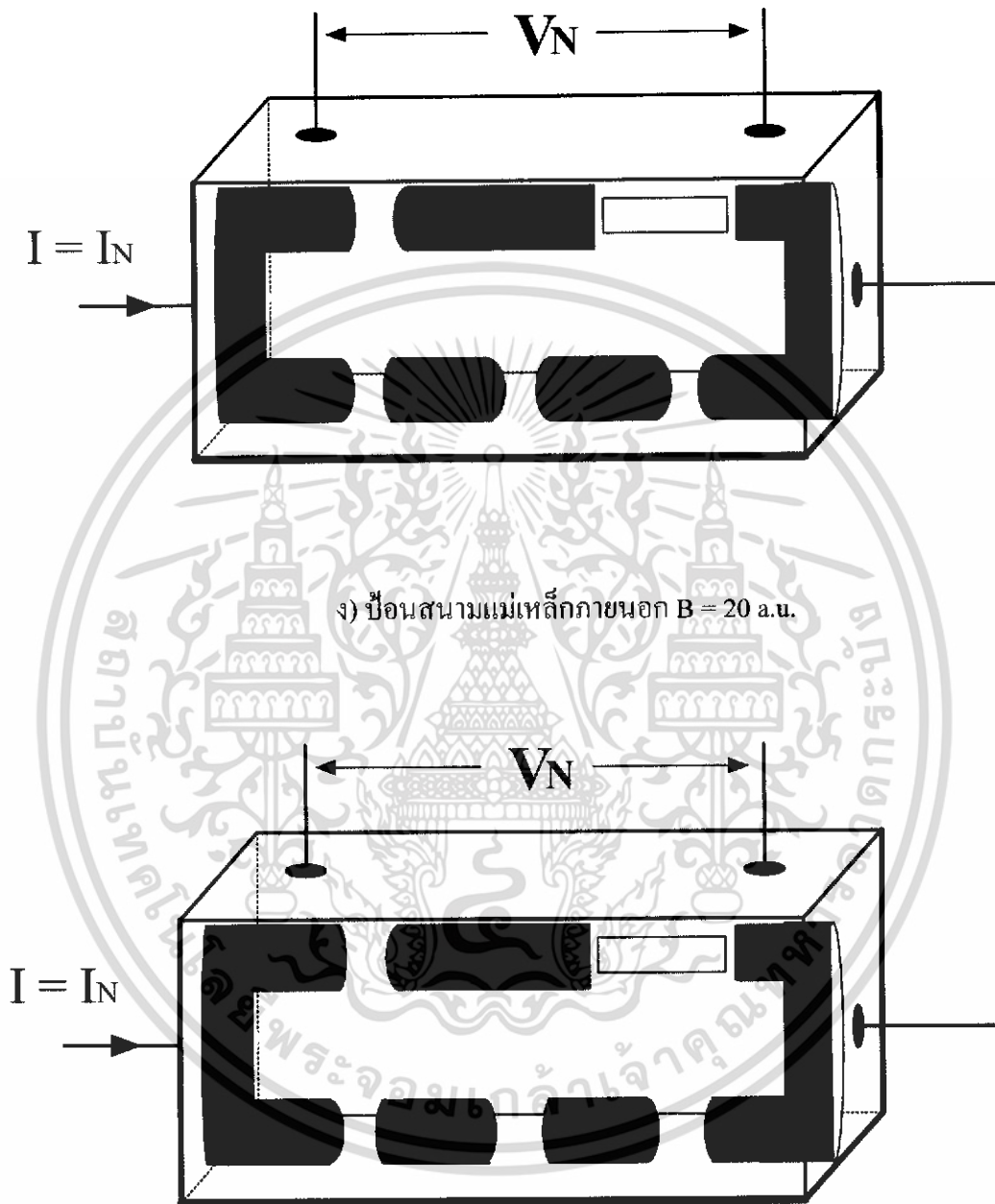


ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 10 \text{ a.u.}$

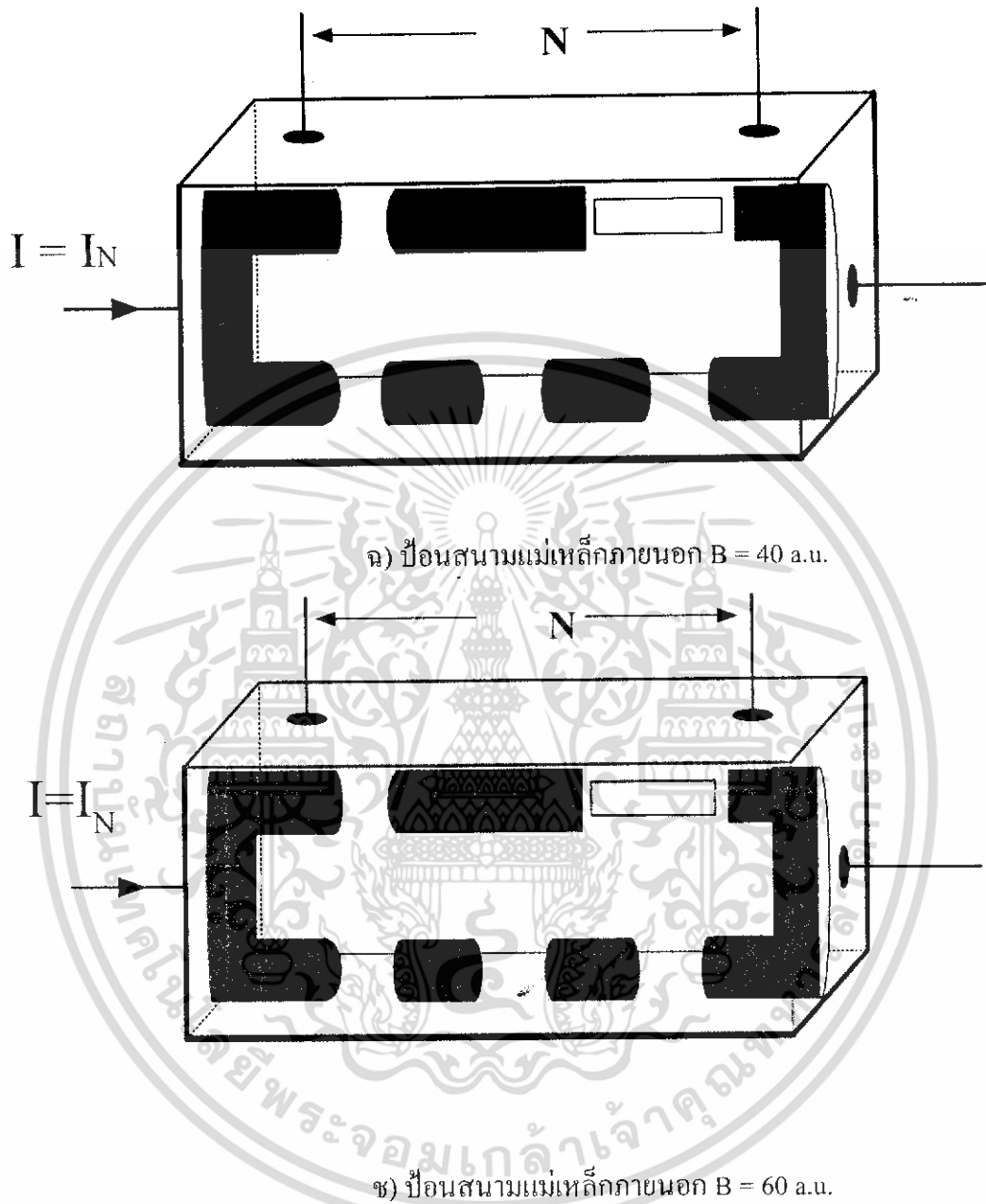


ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 15 \text{ a.u.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



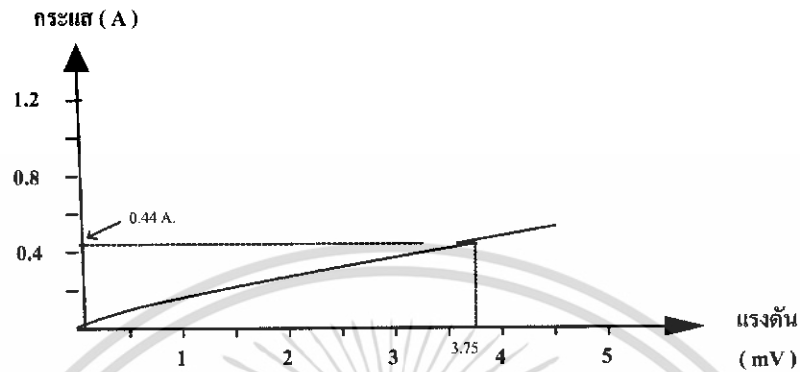
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



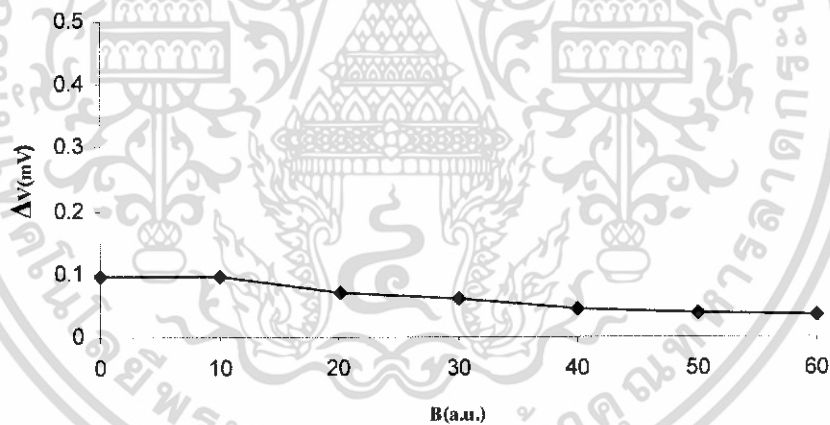
รูปที่ 3.17 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ
ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส



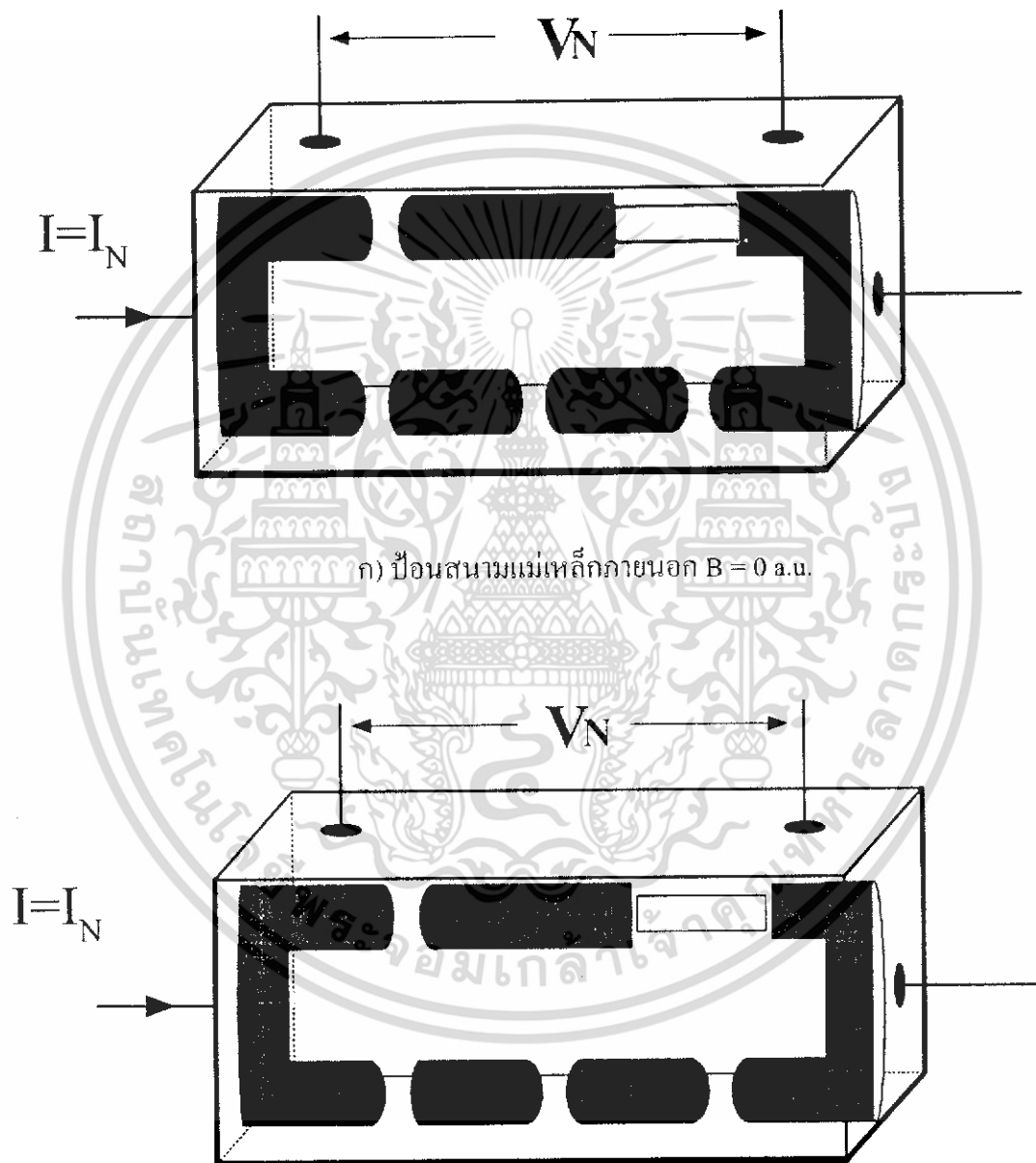
รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส

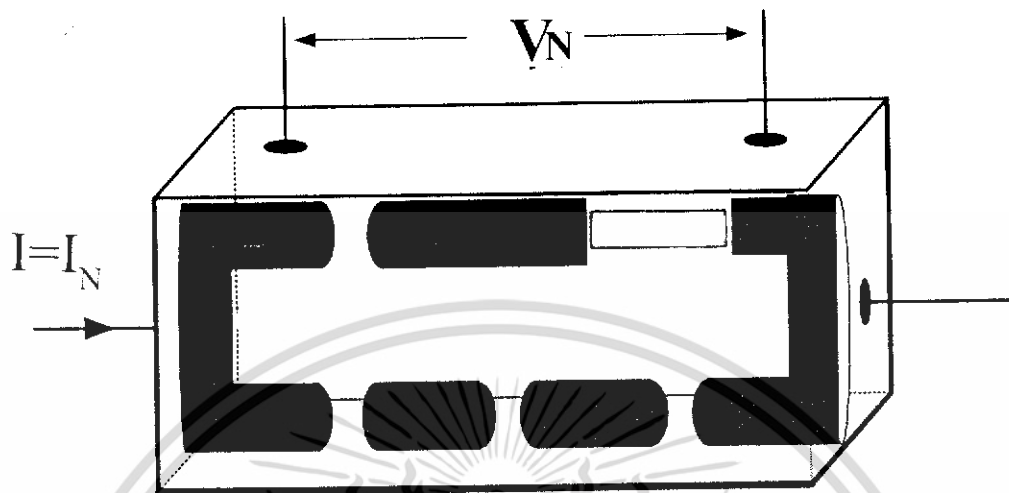
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของสารตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส

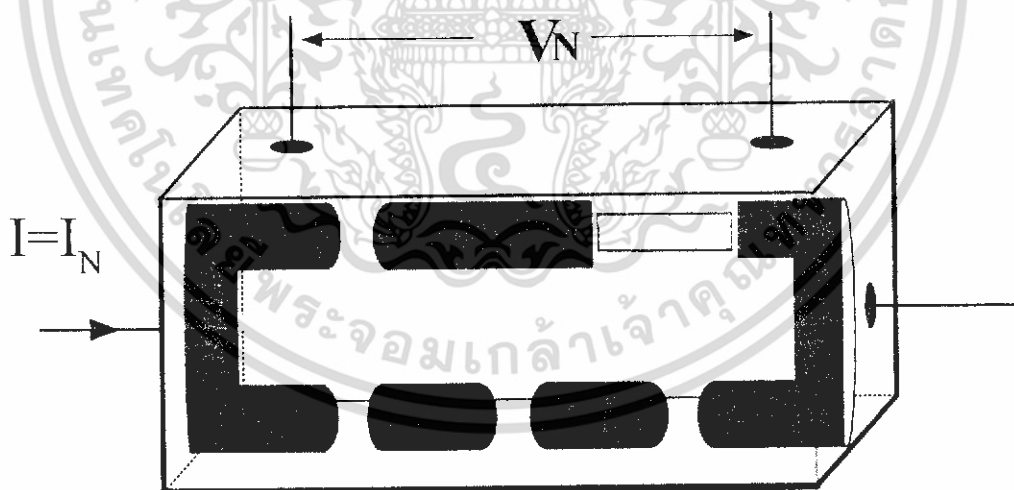


ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 10$ a.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

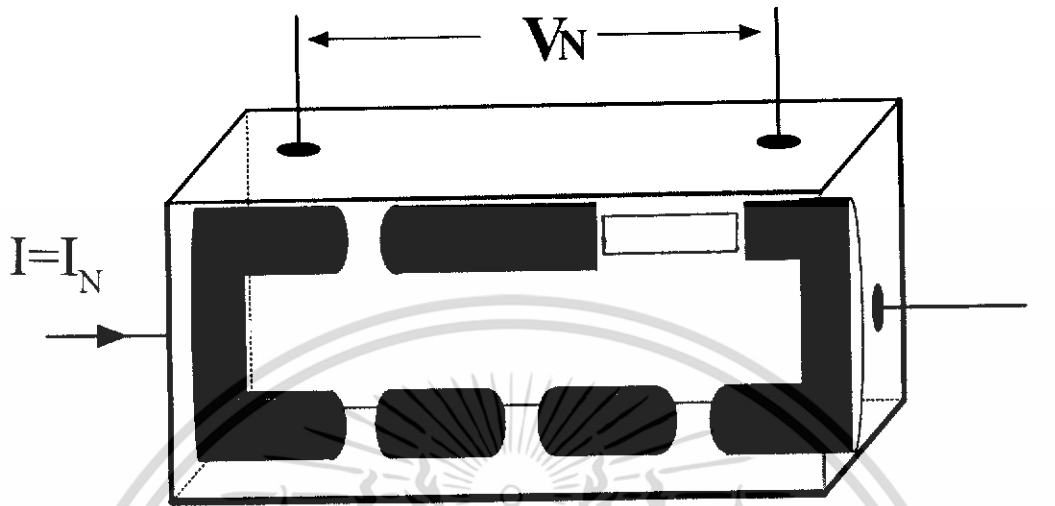


ค) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 15 \text{ a.u.}$

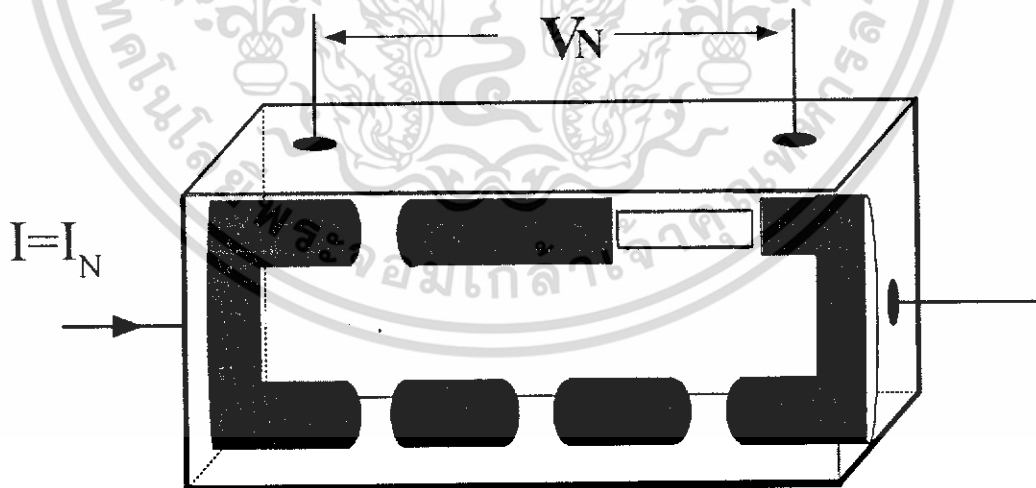


ง) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 20 \text{ a.u.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

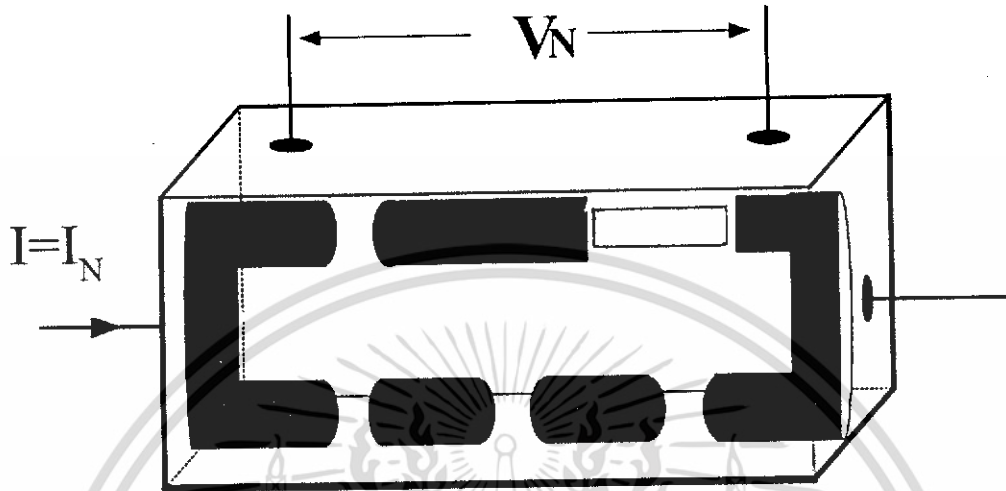


จ) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 30$ a.u.



ฉ) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 40$ a.u.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก $B = 60 \text{ a.u}$

รูปที่ 3.20 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะได้สนามแม่เหล็ก
ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิกำหนด 970 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กภายนอกและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ ในช่วง sintering มีผลต่อค่ากระแสสวิกฤต(I_c)และขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ(ΔV)

ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่ $B=0$ a.u. ค่าของ I_c มีค่าเท่ากับ 0.8 A เมื่อค่าของสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของ I_c มีค่าลดลงและความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับ B ที่ $B=15$ a.u. ทำให้ขนาดของ ΔV มีค่าสูงสุดและเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้นจะทำให้ค่าขนาดของ ΔV มีค่าลดลงตามลำดับ

ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าค่าของ I_c จะมีลดลงเท่ากับ 0.3A และความสัมพัทธ์ระหว่าง ΔV กับ B ที่ $B=10$ a.u. ค่าของ ΔV จะมีค่าสูงสุดและเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าของ ΔV ลดลงตามลำดับ

ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่าค่าของ I_c จะมีค่าน้อยที่สุดและความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับ B เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าของ ΔV จะลดลงตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้อย่างสอดคล้อง

เอกสารอ้างอิง

- 1 พัทรินทร์ บุญเรืองทรัพย์. “ การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- 2 คำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์ .2533. ฟิสิกส์ของแข็ง 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- 3 Matsuda M., Kikuchi A., Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashith T. 1988. “ Observation of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic microstructure. ” Jpn.J.Appl.Phys.27.L529-530.
- 4 Matsuda M., Kikuchi A., Ishii M., Takata M., Yamashith T. and Okamoto S. 1988. “ Processing and Superconducting Properties of $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramics. ” Jpn.J.Appl.Phys.27.L1439-1441.
- 5 Jha A.R. 1998. Superconductor Technology. New York : John Wiley & Sons.
- 6 Kasap S.O. 2000. Principles of Electrical Engineering Materials and Devices. : McGraw-Hill Companies.
- 7 Daniel Hunt V.1989.Superconductivity Sourcebook. New York : John Wiley & Sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

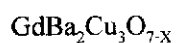
ภาคผนวก

ตารางที่ ก. หน่วยและสัญลักษณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. แสดงคุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด



ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
Gd	157.25	1313	3273
Ba	137.34	725	1637
Cu	63.546	1083	2538
O	15.9994	-218.8	-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. แสดงค่าแรงดันออกที่อุณหภูมิต่างๆของเทอร์โมคัปเปิล สายสีฟ้า-ขาวที่ใช้ในชุดควบคุม
อุณหภูมิเตาเผา

T(°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458		
-100	-3.533	-3.852	-4.138	-4.410	-4.699	-4.912	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
(-)0	0.000	-3.392	-0.777	-1.516	-1.527	-1.889	-2.243	-2.586	-2.920	-3.242
(+)0	0.000	0.973	0.798	1.203	1.611	2.022	2.436	2.805	3.266	3.681
100	4.096	4.508	4.919	5.227	5.733	6.137	6.539	6.939	7.338	7.737
200	8.137	8.537	8.938	9.314	9.745	10.151	10.560	10.969	11.381	11.793
300	21.207	12.623	13.093	13.456	13.874	14.292	14.712	15.132	15.552	15.974
400	16.395	16.818	17.241	17.664	18.088	18.513	18.938	19.363	19.788	20.214
500	20.640	21.066	21.493	21.919	22.346	22.772	23.198	23.624	24.050	24.476
600	24.902	25.227	25.751	26.176	26.599	27.022	27.445	27.867	28.288	28.709
700	29.128	29.547	29.965	30.383	30.799	31.214	31.629	32.042	32.455	32.366
800	33.277	33.686	34.085	34.502	34.909	35.314	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.225	37.724	38.122	38.519	39.915	39.310	39.703	40.096	40.488	40.879
1000	41.269	41.675	42.045	42.433	42.817	43.202	43.585	43.968	44.349	44.729
1100	45.108	45.486	45.863	46.228	46.612	46.985	47.456	47.726	48.095	48.462
1200	48.828	49.192	49.555	49.916	50.276	50.633	50.990	51.344	51.697	52.045
1300	52.398	52.747	53.093	53.439	53.782	54.125	54.466	54.807		

หมายเหตุ แสดงค่าแรงดันมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์ (mV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้