

การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

CONTROL OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Gd-Ba-Cu-O  
SUPERCONDUCTING MATERIAL.

วิสิฐรัฐ วงศ์สุทธิธรรม  
WISIT WONGSUTTHITUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-D-018-053

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

CONTROL OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Gd-Ba-Cu-O  
SUPERCONDUCTING MATERIAL

วิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม

WISIT WONGSUTTITUM

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 77949  
วัน,เดือน,ปี..... 12 ก.พ. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-D-018-058

**CONTROL OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Gd-Ba-Cu-O  
SUPERCONDUCTING MATERIAL**

**WISIT WONGSUTTITUM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-EN-D-018-058**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O
นักศึกษา	นายวิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม
รหัสประจำตัว	45160304
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง

### บทคัดย่อ

จากการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่อุณหภูมิ 77K พบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ แบบ Current controlled negative resistance (CCNR) เกิดขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้า อันได้แก่ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ และค่ากระแสวิกฤต โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกและการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการสร้าง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการเผาในช่วงของการซินเตอร์ริง (Sintering) อีกทั้งยังศึกษาถึงผลของสถานะการจำแม่เหล็กที่มีต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบและค่ากระแสวิกฤตอีกด้วย

ในส่วนของบริษัทวิเคราะห์ ได้นำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง อีกทั้งยังได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในการนำไปอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้งในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคต่อไป

<b>Thesis Title</b>	Control of Electrical Properties of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Material
<b>Student</b>	Mr.Wisit Wongsuttitum
<b>Student ID.</b>	45160304
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

### **ABSTRACT**

By investigating the current-voltage characteristics in Gd-Ba-Cu-O superconducting material, the negative resistance phenomenon is observed as the Current Controlled Negative Resistance type. This thesis would introduce the controlling electrical characteristics such as the magnitude of differential voltage, critical current when external magnetic field was applied and adjust some fabrication parameters such as sintering temperature. However, the effect of magnetic memorization to differential voltage and critical current were additional studied.

According to analysis section, the macrostructure model of Gd-Ba-Cu-O superconductor is suggested to analysis the experimental results. Furthermore, the way of completed development of macrostructure model has been also introduced for explaining the electrical characteristic as equivalent electrical circuit fortunately.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่ให้ทั้งความรู้ แนวทางในการแก้ไขปัญหาและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ คุณจรรยา นามเสนาะ เป็นอย่างสูง ที่ให้กำลังใจและแ่งคิดต่างๆ ขอขอบคุณ คุณอภิชาติ แก้วเจริญ, คุณปิยบุตร ขวัญเมือง, คุณรุ่งทิวี ปิยะนันท์จรัสศรี และน้องๆห้อง Superconductor ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของงานวิจัย, และ คุณลัดดาวัลย์ สุภาดี ที่ช่วยเหลือและเป็นทีปรึกษาที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า น้องชาย และ บุคคลที่สำคัญยิ่งในชีวิตของข้าพเจ้านั้นคือ บิดาและมารดาผู้ให้กำเนิดและให้การสนับสนุนทั้งด้านกำลังทรัพย์และกำลังใจในยามที่ข้าพเจ้าท้อแท้มาโดยตลอด

และบุคคลที่มีคุณค่ายิ่งอีกท่านหนึ่งนั่นคือ Prof.Dr. Masamori Iida ที่ช่วยเหลือทั้งทางด้านแนวคิดและการเรียบเรียง Full paper จนได้รับการตีพิมพ์ที่ Japanese Journal of Applied Physics จะยังคงอยู่ในความทรงจำของข้าพเจ้าและพี่น้องห้อง Superconductor ตลอดไป

วิสิษฐ วงศ์สุทธิธรรม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
ศัพท์เทคนิค.....	XVI
สัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ.....	1
1.1.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: $T_c$ ).....	1
1.1.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: $H_c$ ).....	2
1.1.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: $J_c$ ).....	2
1.2 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	3
1.2.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	3
1.2.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance).....	4
1.2.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect).....	5
1.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	6
1.3.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก.....	6
1.4 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2.....	7
1.5 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance).....	8
1.5.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance).....	8
1.5.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance).....	9
1.6 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	9
1.7 ขอบเขตการวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	11
2.1 เทคนิคกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ Bulk.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.1 Sintering Process.....	11
2.1.2 Melt process.....	11
2.2 คุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .....	12
2.2.1 การวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	12
2.2.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	13
2.2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Y-Ba-Cu-O$ .....	15
2.2.4 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาริบายความสัมพัทธ์ระหว่าง กระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก.....	17
2.2.4.1 การอธิบายความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	17
2.2.4.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลอง โครงสร้างมหภาค.....	18
2.3 คุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ .....	19
2.3.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect).....	19
2.3.2 คุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	20
2.3.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	21
2.3.4 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาริบายความสัมพัทธ์ ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	22
2.4 กฎของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ (Faraday and Lenz's Law).....	23
2.4.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law).....	23
2.4.2 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law).....	24
2.5 การเกิดกระแสคงสภาพและสนามแม่เหล็กคงที่.....	25
บทที่ 3 ผลของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Gd-Ba-Cu-O$ ที่มีต่อ คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	27
3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $Gd-Ba-Cu-O$ .....	27
3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Gd-Ba-Cu-O$ .....	27
3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง.....	28

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	29
3.1.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน.....	29
3.2 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	31
3.2.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	31
3.2.2 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสวิกฤตกับแรงอัดค่าต่างๆ.....	32
3.3 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	32
3.3.1 การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	32
3.3.2 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อค่ากระแสวิกฤต.....	33
3.4 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ.....	34
3.4.1 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	34
3.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารที่ผ่านแรงอัดและ อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ.....	35
3.5 สรุป.....	37
บทที่ 4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	38
4.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ.....	38
4.1.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 2.2$ A .....	39
4.1.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.55$ A.....	39
4.1.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.3$ A.....	40
4.1.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.05$ A.....	41
4.1.5 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.78$ A.....	42
4.1.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.52$ A.....	42
4.1.7 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.39$ A.....	43
4.1.8 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.12$ A.....	44
4.1.9 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต.....	47
4.2 สภาพการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.05$ A.....	49
4.2.2 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.55$ A.....	51
4.2.3 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.3$ A.....	52
4.2.4 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.78$ A.....	52
4.2.5 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.52$ A.....	53
4.2.6 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.39$ A.....	53
4.2.7 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.12$ A.....	54
4.2.8 ผลการจำแม่เหล็กที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต.....	57
4.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ในสถานะการจำแม่เหล็ก.....	58
4.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นสารที่อยู่ในสถานะการจำแม่เหล็ก ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก.....	58
4.3.2 สถานะหลังจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร ที่อยู่ในสถานะการจำแม่เหล็ก.....	61
4.4 สรุป.....	62
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	64
5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชั้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ.....	64
5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้า.....	65
5.2.1 ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 1.55 A.....	65
5.2.2 ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 1.05 A.....	66
5.2.3 ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 0.39 A.....	67
5.2.4 ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 2.2 A.....	68
5.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ.....	69
5.3.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 1.55$ A.....	69

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 1.05$ A.....	70
5.3.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39$ A.....	71
5.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคสำหรับอธิบายสภาวะการจำแม่เหล็ก ของชั้นสารที่มีกระแสสวิกฤตค่าต่างๆ.....	72
5.5 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมายอธิบายสภาวะการจำแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้น.....	74
5.5.1 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 1.55$ A.....	74
5.5.2 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 1.05$ A.....	75
5.5.3 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39$ A.....	76
5.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	77
5.6.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก.....	77
5.6.2 สภาวะหลังจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร.....	79
5.7 สรุป.....	81
บทที่ 6 แนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	82
6.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคเบื้องต้น.....	82
6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	88
6.3 สรุป.....	91
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .....	97
ภาคผนวก ข เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	102

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	123

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	สรุปค่าของ $I_c$ , $J_c$ และ $\Delta V$ ของชั้นสารที่แรงอัด $1.2 \text{ ton/cm}^2$ ณ อุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	37
4.1	สรุปผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ที่มีต่อค่า $\Delta V$ ของชั้นสารที่มี $I_c$ ค่า ต่างๆ.....	47
4.2	ค่า $B_c$ ของชั้นสารที่มีค่า $I_c$ ต่างๆ.....	48
4.3	สรุปค่า $B_{EXT}$ ที่ทำให้ชั้นสารเริ่มเกิดการจำแม่เหล็ก และค่า $V_{MEM}$ ขณะอิมตัวของ ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ.....	56
4.4	สรุปค่าของ $B_{EXT}$ และ $V_{MEM}$ ที่ทำให้เกิดค่า $\Delta V_{MAX}$ .....	57
6.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	87

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ของสถานการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส.....	2
1.2 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	4
1.3 วงจรสำหรับทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	5
1.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	5
1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต.....	6
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2.....	7
1.7 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR).....	8
1.8 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR).....	9
2.1 ขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	12
2.2 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	12
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	13
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	14
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	14
2.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O.....	16
2.7 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	16
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	17
2.9 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่ $I = I_c$ .....	18
2.10 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก.....	20
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	21
2.12 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	21
2.13 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	22
2.14 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้า.....	23

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็ก.....	23
2.16 แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจาก ก) แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวด ข) แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากขดลวด.....	25
2.17 แสดงการเกิด Persistent current.....	25
3.1 กระบวนการสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	29
3.2 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	30
3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	30
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	30
3.5 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2 ton/cm <sup>2</sup> .....	31
3.6 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ.....	32
3.7 กระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Sintering ค่าต่างๆ.....	33
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสวิกฤตและอุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering.....	33
3.9 กระบวนการสร้างเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ.....	34
3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ.....	35
3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับขนาดความต้านทานเชิงลบ ที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ (ที่แรงอัด 1.2 ตัน).....	36
3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความต้านทานเชิงลบกับค่ากระแสวิกฤต.....	36
4.1 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก.....	38
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 2.2$ A ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก.....	39
4.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.55$ A.....	40
4.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.3$ A.....	40
4.5 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.05$ A.....	41
4.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.78$ A.....	42
4.7 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.52$ A.....	43
4.8 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.39$ A.....	44
4.9 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.12$ A.....	45

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับขนาดความต้านทานเชิงลบ ของชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ.....	46
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_C$ กับ $\Delta V_{MAX}$ .....	46
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{EXT}$ กับ $\Delta V_{MAX}$ ของชิ้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ.....	46
4.13 ผลของ $B_{EXT}$ ที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C$ ต่างๆ.....	48
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ที่แสดงผลการจำแม่เหล็ก ของชิ้นสาร $I_C = 1.05 \text{ A}$ .....	49
4.15 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการจำแม่เหล็กของชิ้นสาร $I_C = 1.05 \text{ A}$ .....	50
4.16 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 1.05 \text{ A}$ .....	51
4.17 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 1.55 \text{ A}$ .....	51
4.18 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 1.3 \text{ A}$ .....	52
4.19 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.78 \text{ A}$ .....	52
4.20 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.52 \text{ A}$ .....	53
4.21 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39 \text{ A}$ .....	53
4.22 กราฟความสัมพันธ์ของ $V_{MEM}$ , $\Delta V$ และ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.12 \text{ A}$ .....	54
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{EXT}$ กับ $\Delta V$ ของชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ.....	54
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_C$ กับ $\Delta V_{MAX}$ .....	55
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{EXT}$ กับ $\Delta V_{MAX}$ ของชิ้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ.....	55
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{MEM}$ กับ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ.....	56
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $I_C$ และ $V_{MEM}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C$ เท่ากับ $1.05 \text{ A}$ .....	57
4.28 ความสัมพันธ์ของค่า $I_C$ กับ $B_{EXT}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C$ ต่างๆ (โดยวัดหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว).....	58
4.29 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่ำๆที่มีต่อชิ้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	59
4.30 แรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ $B_{OOP}$ และ $B_{appl}$ .....	60
4.31 ผลของ $B_{appl}$ ที่มีต่อค่า $\Delta V$ ของชิ้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	60
4.32 ผลของ $B_{OPP}$ ที่มีต่อค่า $\Delta V$ ของชิ้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	61
4.33 ผลของ $B_{OOP}$ ที่มีต่อค่าของ $V_{MEM}$ และ $\Delta V$ โดยวัดหลังจากนำแม่เหล็กออกไปแล้ว.....	62
4.34 แสดงค่าของ $\Delta V_{MAX}$ ที่เกิดจาก $B_{EXT}$ และ $B_{Trap}$ ของชิ้นสารที่มีค่า $I_C$ ต่างๆ.....	62

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 แสดงการลดลงของ $V_{MEM}$ ในชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	63
5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต 2.2, 1.55, 1.05 และ 0.39 A.....	64
5.2 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสาร $I_C = 1.55$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	66
5.3 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสาร $I_C = 1.05$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	67
5.4 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสาร $I_C = 0.39$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	68
5.5 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสาร $I_C = 2.2$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	69
5.6 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชั้นสารที่มี $I_C = 1.55$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	70
5.7 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชั้นสารที่มี $I_C = 1.05$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	71
5.8 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชั้นสารที่มี $I_C = 0.39$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	72
5.9 อธิบายการเกิดสภาวะการจำแม่เหล็ก โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	73
5.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ใช้อธิบายสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	73
5.11 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่มี $I_C = 1.55$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	74
5.12 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่มี $I_C = 1.05$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	75
5.13 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่มี $I_C = 0.39$ A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค.....	76
5.14 ผลของ $B_{app}$ และ $B_{opp}$ ที่มีต่อชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก.....	78
5.15 ผลของ $B_{OOP}$ ที่มีต่อค่าของ $V_{MEM}$ และ $\Delta V$ โดยวัดหลังจากนำแม่เหล็กออกไปแล้ว.....	80
6.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า.....	82
6.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะ $I > I_C$ .....	83

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 แสดงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น.....	83
6.4 การไหลของกระแสไฟฟ้าในขณะที่ $V=V_{TH}$ และ $V=V_N$ .....	84
6.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าในขณะก่อนและหลังการเกิดความต้านทานเชิงลบ.....	84
6.6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสาร ที่มีค่า $I_C = 1.05$ A ในขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	85
6.7 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นของกราฟ A.....	86
6.8 ผลของ $B_{EXT}$ ที่มีต่อค่า $R_1$ , $R_2$ และ $\Delta V$ .....	88
6.9 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.2 mT.....	89
6.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.35 mT.....	90
6.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.6 mT.....	91

## ศัพท์เทคนิค

กระแส	Current
แกดโกลิเนียมออกไซด์	Gadolinium Oxide
ความซึมซับได้ทางแม่เหล็ก	Magnetization
ความซึมซับได้ในสูญญากาศ	Permeability of free space
ความซึมซับได้สัมพัทธ์	Relative Permeability
ความต้านทาน	Resistance
ความต้านทานเชิงลบ	Negative Resistance
ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Critical Current Density
ค่าวิกฤต	Critical Values
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
เครื่องบันทึกสองแกน	X-Y Recorder
จุดคอด	Weak Point
เซรามิก	Ceramic
เซลเซียส	Celcius
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	Macrostructure Model
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	Meissner Effect
ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
แม่เหล็กเฟอร์โร	Ferromagnetic
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Field
สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	Magnetic Susceptibility
สารแม่เหล็ก	Magnetic Substance
อิทเทรียมออกไซด์	Yttrium Oxide

# บทที่ 1

## บทนำ

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีค่าความต้านทาน กระแสไฟฟ้าจึงสามารถไหลผ่านได้โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ดังที่ได้เกิดขึ้นในโลหะตัวนำทั่วไป และไม่เกิดความต่างศักย์ จึงทำให้มีการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์และช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาสร้างเป็นสายเคเบิลแทนโลหะ การใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แทนแท่งแม่เหล็กถาวร [1] และใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จึงช่วยให้อุปกรณ์ มีขนาดเล็กกลงโดยไม่มีอุปสรรคในเรื่องของการสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย

### 1.1 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ค่าต่างๆเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีการมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

#### 1.1.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: $T_c$ )

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ  $\frac{3}{4} T_c$  นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิค่า ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [2] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า  $T_c$  เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชิ้นสารที่ใช้มีค่า  $T_c \approx 93$  K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

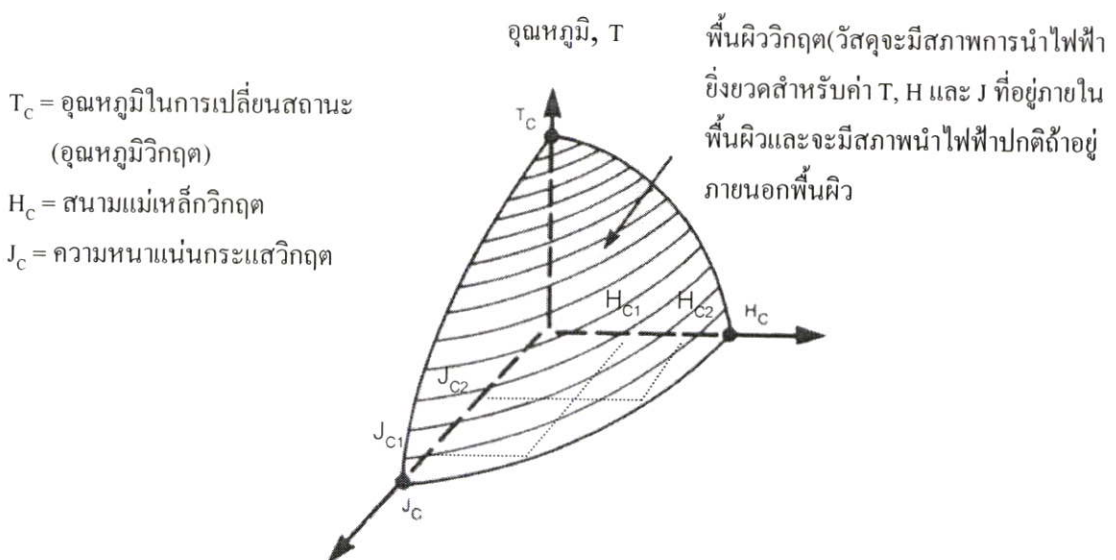
ถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ  $T_c$  มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่วงการทางวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริงต่อไป

### 1.1.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: $H_C$ )

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field:  $H_C$ )

### 1.1.3 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 1.1 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.1 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต  $J_C$  มากๆ เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น  $H_1$  ค่า  $J_C$  จะมีขนาดลดลงเป็น  $J_{C1}$  และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น  $H_2$  ค่า  $J_C$  ก็จะลดลงเหลือ  $J_{C2}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง

หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

## 1.2 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

### 1.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

ในปี ค.ศ. 1933 ไมส์เนอร์ (W. Meissner) และ โอเซนเฟลด์ (R. Ochsenfeld) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสนามแม่เหล็กพบว่า ตัวนำไฟฟ้าสภาพปกติจะยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านเข้าไปในตัวของมันได้ แต่ถ้าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะผลักสนามแม่เหล็กออกไป ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่า ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

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

โดยที่

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

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

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

$\chi_m$  คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

$\mu_0$  คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

$\mu_r$  คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

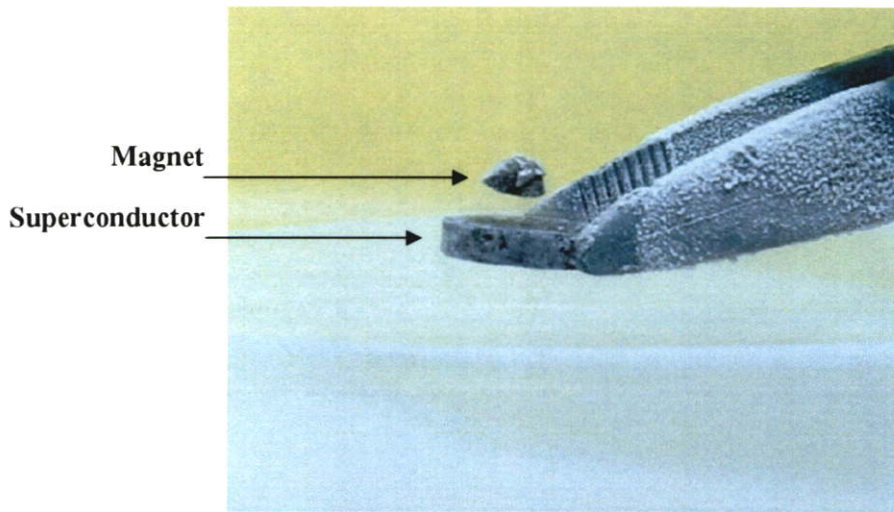
เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้  $B = 0$  ทำให้

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

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

$$\mu_r = 0$$

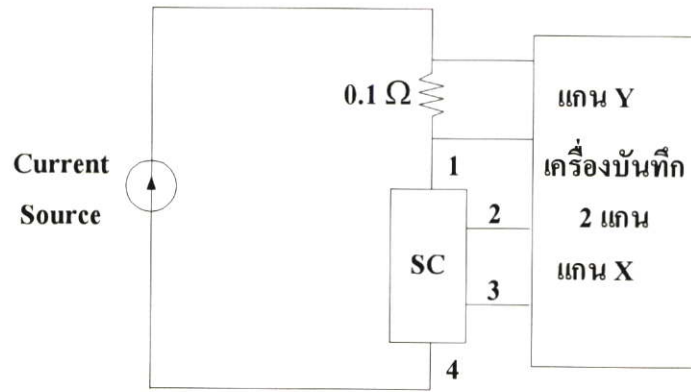
(1.6)



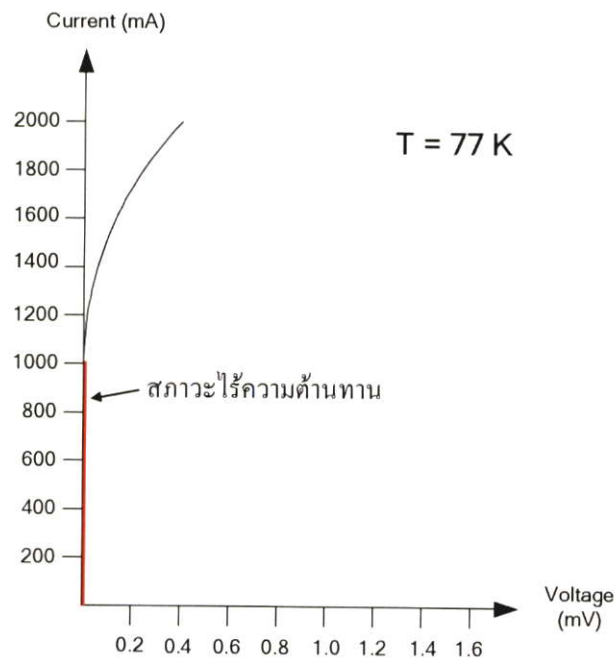
รูปที่ 1.2 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ( Meissner Effect )

### 1.2.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ ) ชิ้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือ ความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.3 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่ปรับค่าได้ (D.C. Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสารได้ถูกหล่อเย็นอยู่ภายในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่า กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 วงจรสำหรับทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

### 1.2.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_c = 1.08 \text{ A}$ ) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี จากกราฟ จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นสารเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยิ่งยวดได้ถูกทำลายด้วยค่ากระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

### 1.3 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

#### 1.3.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ ) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชิ้นสารจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต  $H_c(T)$  ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิ และที่อุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ  $H_c(T_c) = 0$  สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

เมื่อ  $T < T_c$  สนามแม่เหล็กภายนอก  $H_a = 0$  เป็นสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

$T < T_c$  สนามแม่เหล็กภายนอก  $H_c > H_a > 0$  เป็นสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

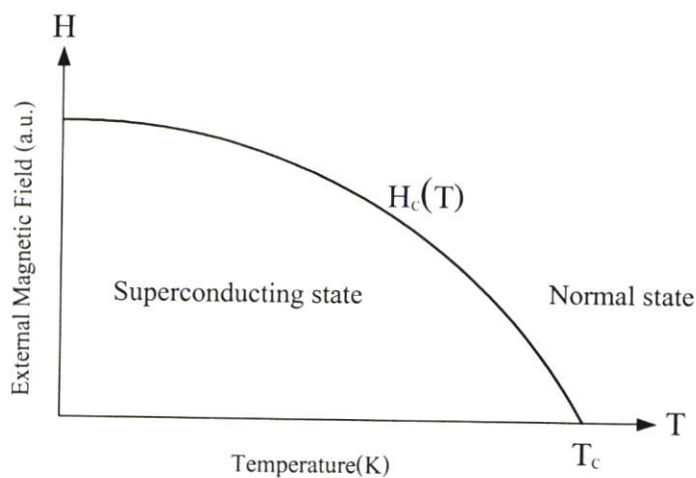
$T < T_c$  สนามแม่เหล็กภายนอก  $H_a > H_c$  เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จะเห็นได้ว่าในขณะที่  $T = T_c$  เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ( $T = T_c$  ได้  $H_c = 0$ ) แต่ถ้า  $T \ll T_c$  ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามาก ๆ จึงจะทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

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

เมื่อ  $H_c(T) =$  สนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ

$H_c(0) =$  สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

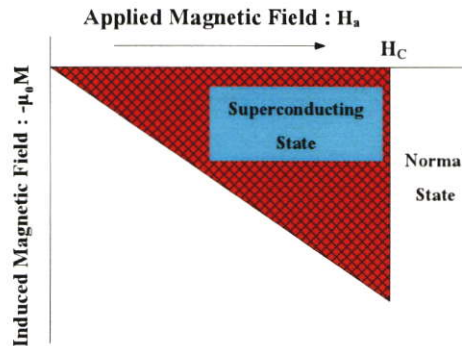


รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต

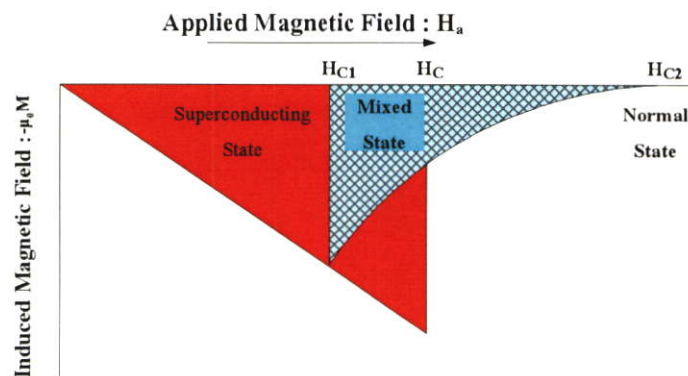
## 1.4 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 [3]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น โดยมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\vec{M} = -\vec{H}_a$ ) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีคุณสมบัติเป็นไดอะแมกเนติกที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอ็อกไซด์ 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 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมส์เนอร์นั่นเอง



ก) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1



ข) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2

พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H_0$ ) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization ( $M$ ) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

กรณีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ( $H_C$ ) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

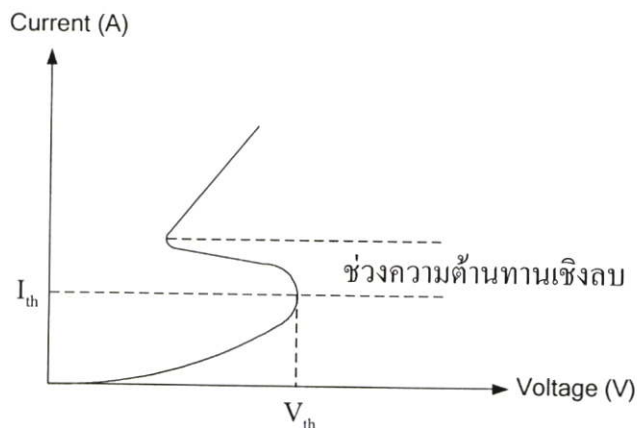
กรณีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้ จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก  $H_{C1}$  จากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า  $H_{C2}$  สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

## 1.5 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบมักเกิดขึ้นกับวัสดุประเภท ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

### 1.5.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

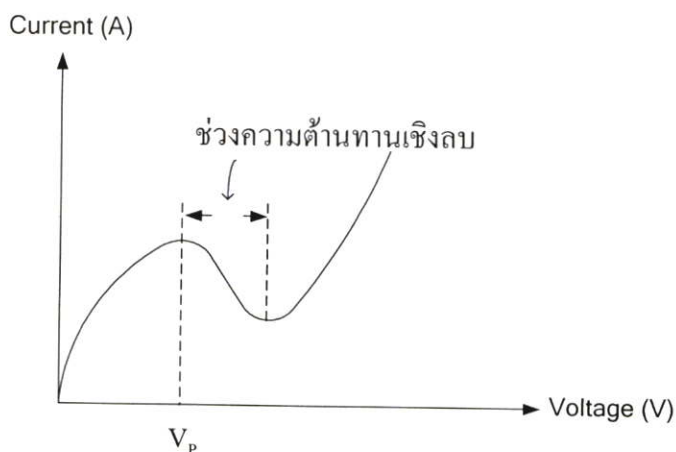
ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายอักษรตัว S ดังรูปที่ 1.7 ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง  $V_{TH}$  (Threshold voltage) แรงดันไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ค่ากระแสเกือบคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current controlled negative resistance (CCNR) ซึ่งจะพบในอุปกรณ์ดังนี้ Silicon-Controlled-rectifier (SCR), Uni-Junction Transistor (UJT) เป็นต้น



รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

### 1.5.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับอักษรถั่ว N ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage controlled negative resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode เป็นต้น



รูปที่ 1.8 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

### 1.6 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารประกอบที่ใช้ในการสร้าง แต่ยังไม่มียังงานวิจัยแห่งใดกล่าวถึง คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ (Negative resistance) ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเลย จนในปี พ.ศ. 2544 ที่ห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีทีมงานวิจัย คือ นาย วิสิษฐ วังศ์สุทธิธรรม นายณภดล สิทธิพล และ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง ได้ค้นพบ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ขึ้นเป็นครั้งแรกที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน สำหรับความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Current controlled negative resistance (CCNR) ทีมวิจัยพยายามที่จะศึกษาถึงกลไกการเกิดความต้านทานเชิงลบและวิธีการควบคุมค่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบรวมถึงค่ากระแสวิกฤต อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวอีกด้วย

## 1.7 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก การควบคุมขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบและค่ากระแสวิกฤต โดยใช้สนามแม่เหล็กภายนอกและการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการสร้าง สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง ได้นำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มาร่วมในการวิเคราะห์ผลการทดลองครั้งนี้ด้วย เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท คำโครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ ได้กล่าวถึง คุณสมบัติทางกายภาพและปรากฏการณ์ที่สำคัญซึ่งเป็นพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงความเป็นมาของงานวิจัย

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  และ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  รวมถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้ง 2 ชนิด

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลองเกี่ยวกับผลของกระบวนการสร้างอันได้แก่ อุณหภูมิการเผาในการซินเทอร์ริงและแรงอัดในการขึ้นรูปที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 4 เป็นการทดลองและผลการทดลองเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน รวมถึงผลของสภาวะการจำแม่เหล็กที่มีต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 6 กล่าวถึง แนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและวิจารณ์

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

### 2.1 เทคนิคกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ Bulk

ในปัจจุบันมีกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ Bulk ได้หลายวิธี แต่กระบวนการสร้างที่นิยมมากที่สุด มี 2 กระบวนการด้วยกัน คือ

#### 2.1.1 Sintering Process

เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิในการเตรียมชิ้นสารไม่สูงนัก(ไม่เกิน  $950^{\circ}\text{C}$ ) กระบวนการไม่ซับซ้อน และใช้ต้นทุนในการสร้างไม่มาก อย่างไรก็ตาม ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างโดยกระบวนการนี้ ถึงแม้จะมีค่า  $T_c$  ที่สูงไม่ต่างจากกระบวนการสร้างอื่น แต่  $J_c$  นั้นยังคงมีค่าต่ำ ( $10^1$ - $10^2$  A/cm<sup>2</sup>) อันเนื่องมาจาก weak link ที่เกิดขึ้นระหว่าง grain boundary [4]

โดยทั่วไปสารที่เตรียมโดยการ Sintering มักจะถูกเตรียมจากผงสารที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อหลีกเลี่ยงสารเจือปน ที่จะนำไปสู่การลดลงของ  $T_c$  และ  $J_c$  และส่วนผสมของสารเริ่มต้นควรจะต้องผสมให้เข้ากันแล้วนำไป calcine ที่อุณหภูมิในช่วง 900-940 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-24 ชม. แล้วจึงนำไปบดให้ละเอียด เพื่อนำไปเผาซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าได้เนื้อสารที่มีความสม่ำเสมอขององค์ประกอบตามต้องการ

เนื่องจากค่า  $J_c$  ที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำนี้เอง จึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัย weak link ที่เกิดขึ้นทำให้ชิ้นสาร เสียสภาพได้โดยง่ายเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ Sintering process ในการเตรียมชิ้นสารเพื่อใช้ในการทดลอง ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป

#### 2.1.2 Melt process [5]

กระบวนการสร้างโดยวิธี Melt process สามารถเพิ่มค่า  $J_c$  ได้สูงกว่าแบบ Sintering มาก ( $10^4$ - $10^6$  A/cm<sup>2</sup>) เนื่องจากสามารถลด weak link ที่เกิดขึ้นได้ แต่ทั้งนี้กระบวนการ Melt process เองก็มีรายละเอียดปลีกย่อยและเทคนิคค่อนข้างมาก แต่โดยหลักการหลักๆ คือ สารที่ถูกเตรียมจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวหรือใกล้จุดหลอมเหลว(1200-1300 องศาเซลเซียส) แล้วผ่านขั้นตอนในบางส่วนที่ลดอุณหภูมิของสารลงอย่างช้าๆ เพื่อลดปัญหาที่เกี่ยวกับการเรียงตัวของ grain และลด stress ที่จะเกิดขึ้น ณ บริเวณ grain boundary อันเป็นสาเหตุของการเกิด weak link

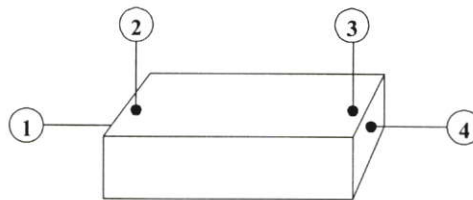
สำหรับ Melt process สามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้อีกหลายวิธีด้วยกัน อย่างเช่น Melt-texture-growth (MTG), Oxygen-controlled-melt-growth (OCMG) process

## 2.2 คุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

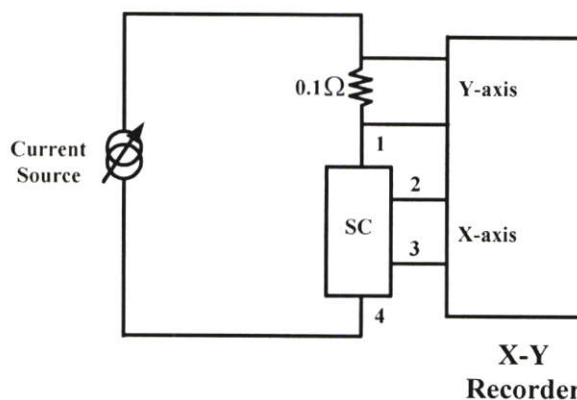
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (Y-Ba-Cu-O) เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 โดยมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ 95 เคลวิน ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ในรูปของบัลค์ (Bulk) นิยมสร้างโดยใช้กระบวนการ Sintering [6] ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก.

### 2.2.1 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

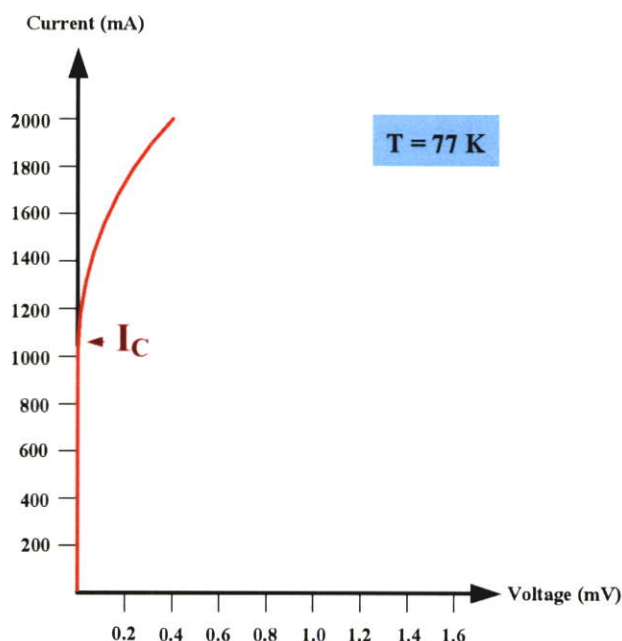
หลังจากที่ได้มีคสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.1 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.2 โดยที่กระแสจะไหลเข้า - ออก จากชิ้นสารที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2 และ 3 ในขณะที่ทำการทดลอง ชิ้นสารจะถูกหล่อเย็นอยู่ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกบันทึกลงในเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.2 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



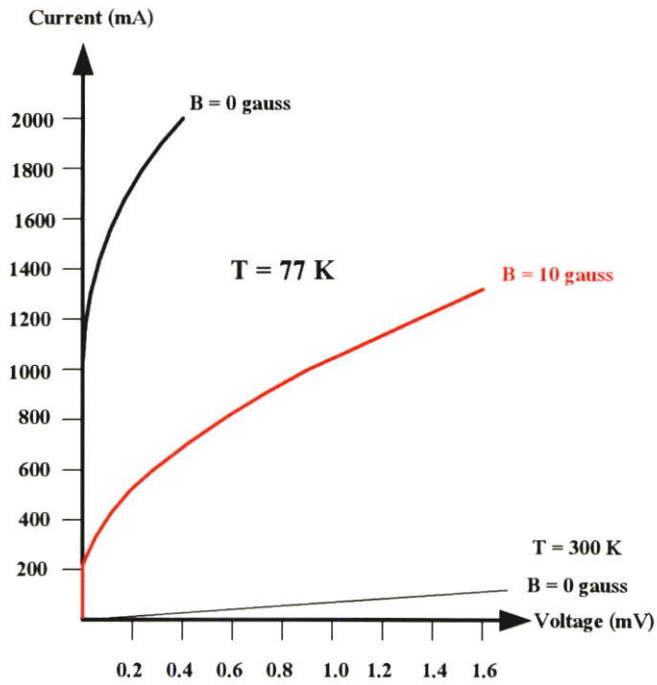
รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ากระแสวิกฤตของซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 1.08 A. ดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A. ซึ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมซึ้นสารเกิดขึ้น

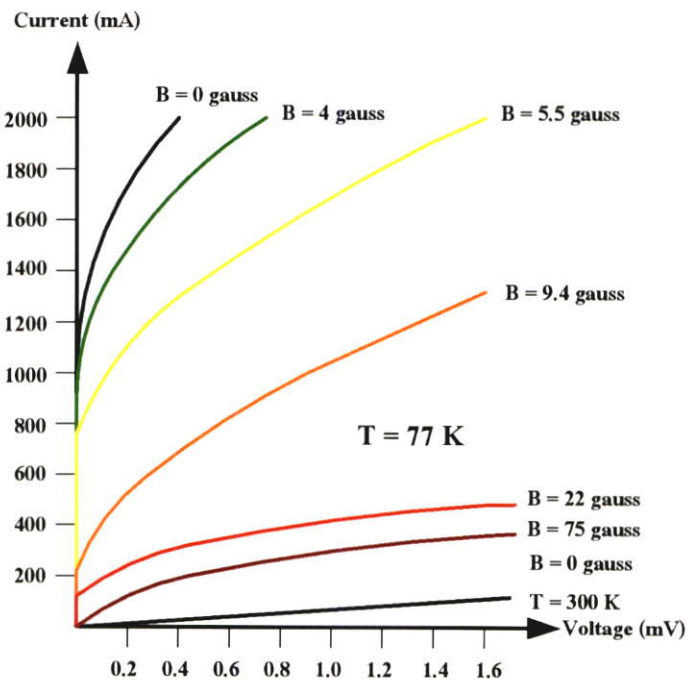
### 2.2.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในขณะที่ซึ้นสารกำลังเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสาเหตุที่ทำให้ซึ้นสารเสียสภาพนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับซึ้นสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ซึ้นสารเสียสภาพไป จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมซึ้นสารขึ้น ในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ยังคงใช้วงจรดังรูป 2.2 โดยแสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป แต่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ 1.08 แอมแปร์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา 10 gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือประมาณ 200 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่อุณหภูมิ 77 K โดยให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

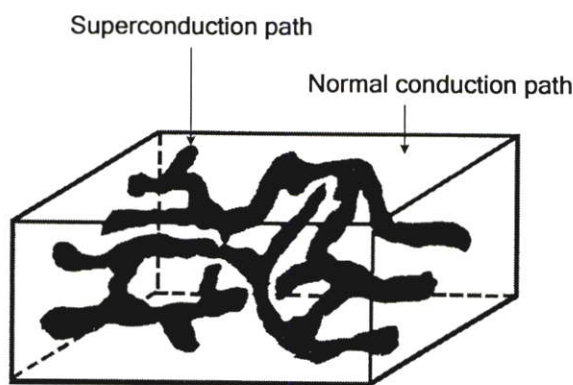
เราสามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่อยู่ในอุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าต่างๆเท่านั้น แต่เมื่อชั้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c = 95$  K) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชั้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการป้อนกระแสให้กับชั้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชั้นสารจะเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด[7] สามารถยืนยันได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสาร ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในรูปที่ 2.5 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดต่ำลงตามลำดับ

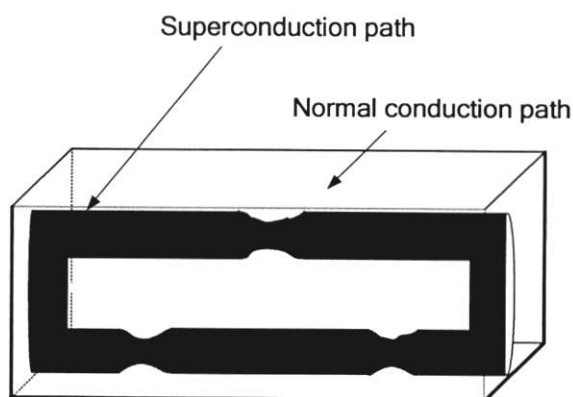
สำหรับทิศทางของการให้สนามแม่เหล็กนั้น เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติแบบ Isotropic คือไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก [8] ในการทดลองจึงสามารถให้สนามแม่เหล็กแก่ชั้นสารในทิศทางใดก็ได้

### 2.2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O [9]

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconduction path) แสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ (Normal conduction path) ดังนั้นการที่ชั้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด (Weak point) และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณาในรูปของแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยที่ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดในรูปที่ 2.6 จะถูกแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



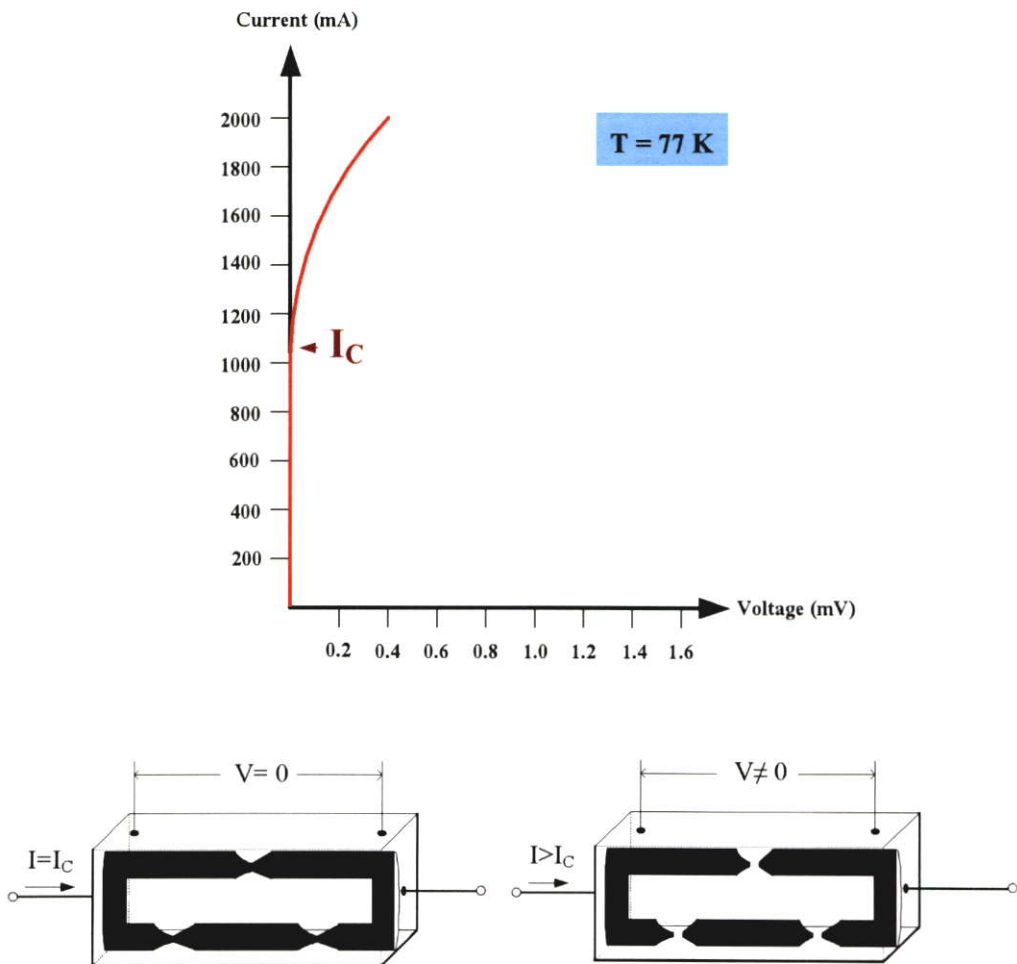
รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดยิ่งนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามีการเกิดจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอดอีก 2 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.7 นั้นมีอยู่จริงในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากในขณะทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวชิดติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการ Sintering ก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้นและกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิก แต่ก็ยังพบว่ามีบางจุดที่เนื้อสารยังมีการเชื่อมต่อยังไม่แข็งแรงนัก จึงเกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.7 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้าชิ้นสารเกิดการเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อตัวนำบริเวณที่ขาดก่อนก็คือส่วนของจุดคอด ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y - Ba - Cu - O

2.2.4 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.2.4.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.3 สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.8 จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นส่วนน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต ( $I_C$ ) พบว่าในขณะที่ชิ้นส่วนยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิยิ่งยวดจะยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ความต้านทานในชิ้นส่วนจึงไม่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีแรงดันตกคร่อมชิ้นส่วนในขณะนั้น

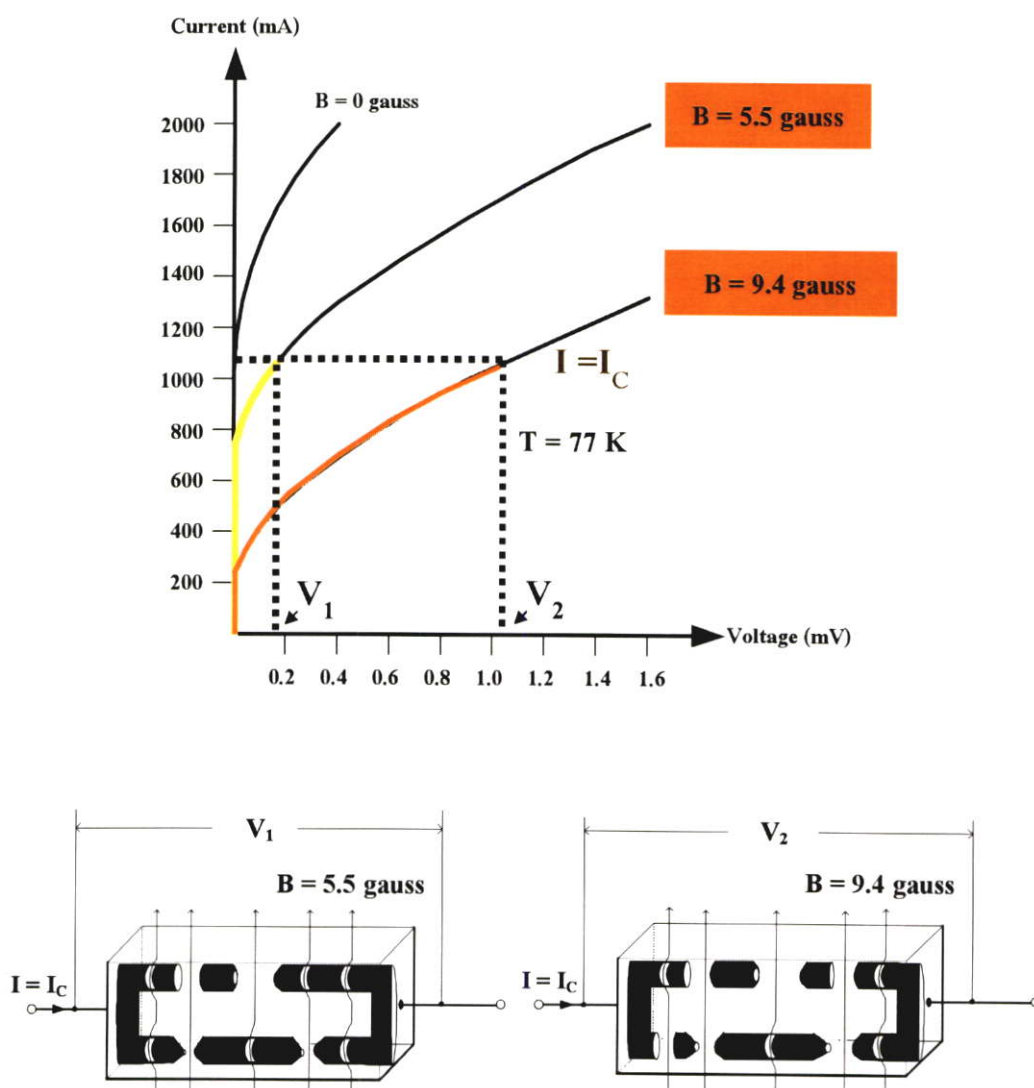


รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารมากกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_C$ ) จะทำให้ชิ้นสารเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดในส่วนที่เป็นจุดคอดจะถูกทำลายกลายเป็นส่วนนำไฟฟ้าธรรมดา (Normal conduction part) หรือกล่าวโดยง่ายก็คือจุดคอดจะขาดออกจากกัน จึงมีความต้านทานเกิดขึ้นภายในชิ้นสารทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้นและจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสสูงขึ้น

#### 2.2.4.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ให้กับชิ้นสาร



รูปที่ 2.9 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำที่  $I = I_C$

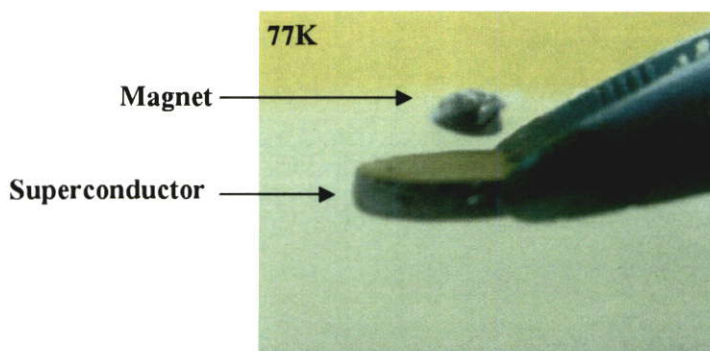
พิจารณารูปที่ 2.9 ในขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสาร  $I = I_C$  เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ  $B = 5.5$  gauss ให้กับชิ้นสารในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนจะถูกทำลาย โดยเฉพาะส่วนที่เป็นจุดคอดและส่วนที่ไม่สมบูรณ์จะขาดออกและเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ( $V_1$ ) และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น  $B = 9.4$  gauss จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารมีค่าเพิ่มขึ้น ( $V_2$ ) เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะเข้าไปทำลายส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีปริมาณส่วนขาดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้านทานภายในชิ้นสารมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจึงเพิ่มขึ้น

## 2.3 คุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

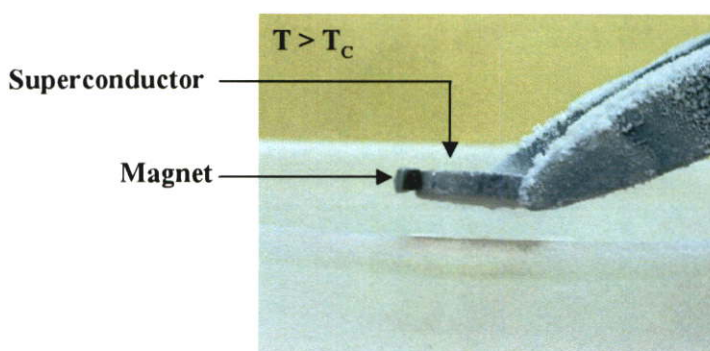
เมื่อพิจารณาถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ 2.2 กับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  จะเห็นได้ว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดมีสูตรทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน คือ มีอัตราส่วนโดยอะตอมของธาตุเป็น 1:2:3 มีเพียงสารตั้งต้นเท่านั้นที่ต่างกัน โดยทั่วไปมักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในกลุ่ม RE 1:2:3 (RE: rare earth elements) ถึงแม้ว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งสองชนิดจะอยู่ในกลุ่มเดียวกันแต่มีคุณสมบัติบางอย่างที่แตกต่างกัน อย่างเช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  (Gd-Ba-Cu-O) ดังนี้

### 2.3.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect)

อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature:  $T_C$ ) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีค่าประมาณ 93 K ซึ่งต่ำกว่า Y-Ba-Cu-O เล็กน้อย สำหรับการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ เป็นวิธีการทดสอบเมื่อดำเนินการอยู่ในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยนำเม็ดสารมาลดอุณหภูมิลงให้ต่ำกว่าค่า  $T_C$  ของชิ้นสารโดยการหล่อเย็นในไนโตรเจนเหลว (77 K) จากการทดสอบพบว่าในขณะที่ชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่า  $T_C$  ชิ้นสารจะมีการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นเช่นเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นๆ แต่เมื่อชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่าค่า  $T_C$  ชิ้นสารจะเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด บางส่วนของชิ้นสารสามารถดูดชิ้นแม่เหล็กได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้เนื่องมาจากสารแกดโดลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จัดว่าเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ซึ่งมีอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) อยู่ที่ 289 เคลวิน



ก) การผลึกแม่เหล็ก

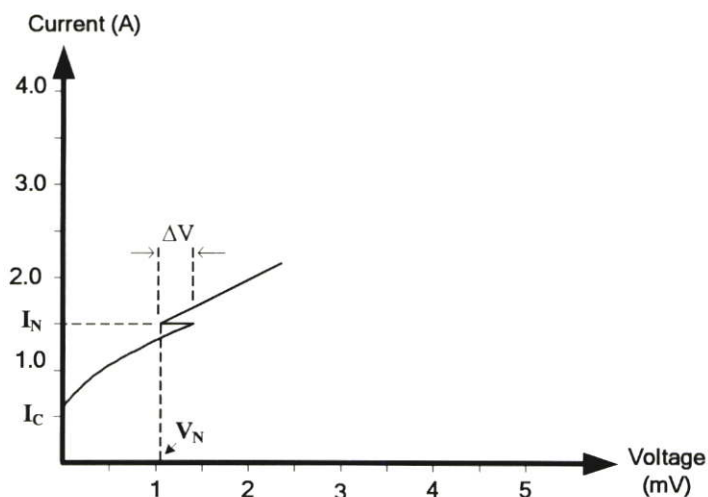


ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.10 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลึกแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

### 2.3.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

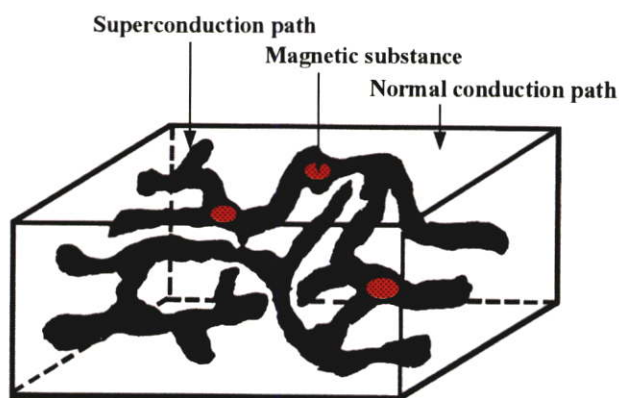
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 K แสดงดังรูปที่ 2.11 พบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น [10], [11] ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยกอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส ( $I_N$ ) เท่ากับ 1.5 A โดยมีขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) เท่ากับ 0.25 mV โดยที่ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Current controlled negative resistance (CCNR)



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

### 2.3.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O [12]

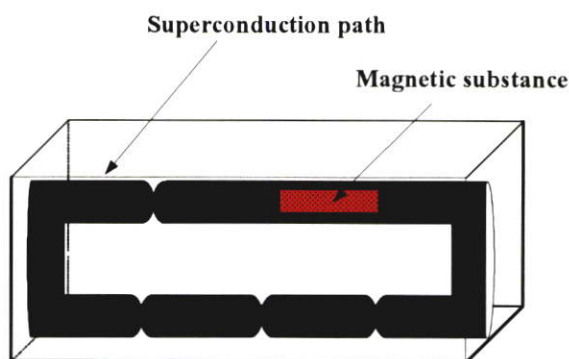
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้นโดยวิธี Sintering process มีเนื้อสารเป็นเซรามิกและจากการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์แสดงให้เห็นว่ามีส่วนของสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในเนื้อสารซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแกดโกลิเนียม แบบจำลองโครงสร้างมหภาคจึงเป็นดังรูปที่ 2.12 โดยมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็ก กระจายอยู่ภายในส่วนของ Superconduction path



รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

สำหรับแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่าย ในส่วนของ Superconduction path จะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งในส่วนของท่อด้านล่าง จะมีบริเวณจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อนบนมีบริเวณจุดคอด 1 จุดและมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในท่อทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.13 ถ้า

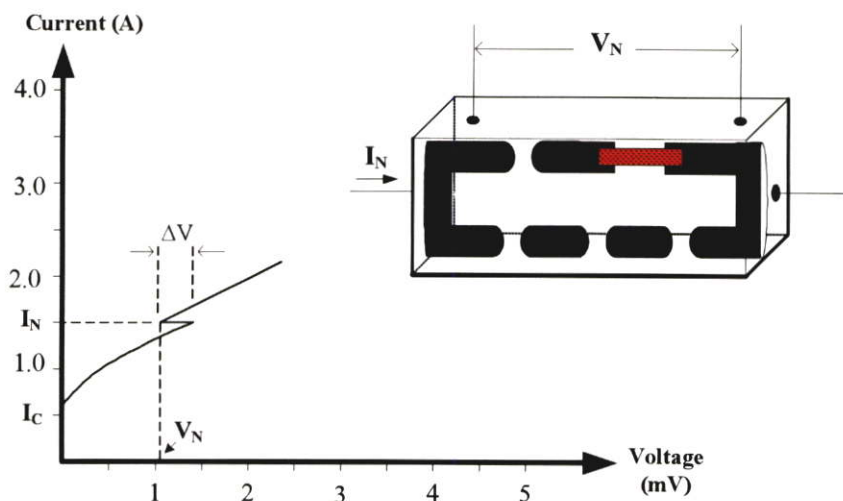
พิจารณาจากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่า การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเสียดสภาพได้นั้น เกิดจากส่วนที่เป็นท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขาดออก และบริเวณที่ขาดง่ายที่สุดคือ บริเวณส่วนของจุดคอด ในส่วนของท่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณมากพอ ในส่วนนี้ก็จะขาดออกและขาดเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กที่อยู่ภายในท่อมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.13 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

### 2.3.4 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

จากกราฟในรูปที่ 2.11 สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดเชื่อมต่อกันตลอดทั้งชิ้นสาร จึงไม่เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ชิ้นสารจะเสียดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณ จุดคอด จะถูกทำลายเป็น ส่วนนำไฟฟ้าธรรมดา ทำให้ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณนี้ขาดออกจากกัน จึงเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณส่วนขาดของท่อด้านบนมีปริมาณส่วนขาดน้อยกว่าท่อด้านล่าง กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจึงไหลผ่านท่อด้านล่าง ในขณะที่เราจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านบนเป็นหลัก และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ส่วนขาดมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงค่า  $I_N$  ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น เนื่องมาจากส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กถูกทำลายให้ขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับจุดคอด ทำให้ค่าความต้านทานที่ท่อด้านบนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจึงไหลผ่านท่อด้านล่างซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงแรงดันค่าหนึ่ง

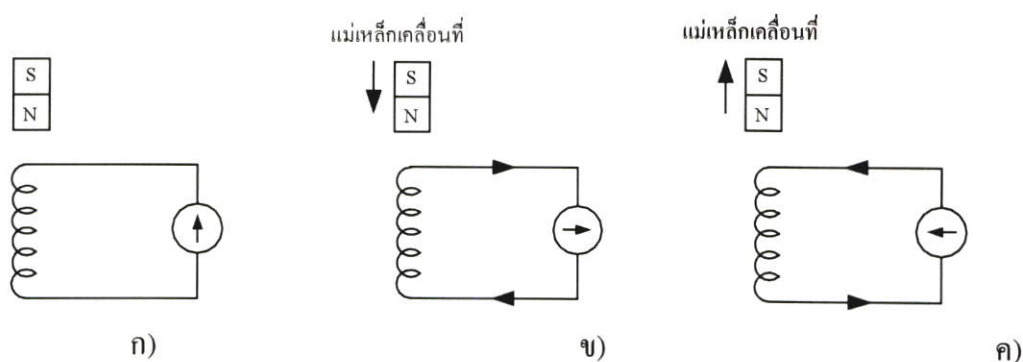


รูปที่ 2.14 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

## 2.4 กฎของฟาราเดย์และกฎของเลนซ์ (Faraday and Lenz's Law)

### 2.4.1 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) [13]

ฟาราเดย์ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าต่อขดลวดที่ต่อเป็นวงจรแสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งพบว่า



รูปที่ 2.15 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็ก

ขณะที่แท่งแม่เหล็กและขดลวดอยู่กับที่ทั้งคู่จะไม่มีกระแสไหลในขดลวด เมื่อขั้วเหนือของแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2.15 ข) จะเกิดกระแสเหนี่ยวนำที่ไหลใน

ทิศทางหรือเส้นทางตามที่แสดงในรูป แต่เมื่อชั่วหนือของแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ก) กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับกรณีแรก

จากผลการทดลองที่ได้ ฟาราเดย์สรุปว่า สนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา (time-varying magnetic field) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (electromotive force; emf) ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในวงปิดของวงจร โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่มีขดลวดเป็นขอบ ดังสมการ

$$\text{emf} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

โดยที่ emf คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น โวลต์

$\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (waber)

ส่วนเครื่องหมายลบ แสดงทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งเราจะทราบได้จากกฎของเลนซ์ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

#### 2.4.2 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law) [14]

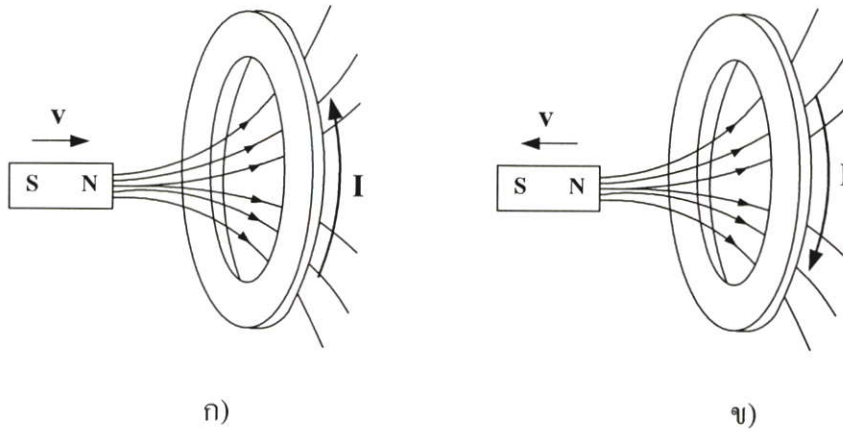
เครื่องหมายลบในกฎของฟาราเดย์ เป็นตัวบอกให้เราทราบว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในทิศทางใดของวงจร โดยที่การคำนวณหาขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเราอาศัยกฎของฟาราเดย์ แต่การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเราต้องอาศัยกฎของเลนซ์

กฎของเลนซ์ระบุว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไหลในเส้นทางหรือทิศที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อวงจรหรือลูป

กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพยายามรักษาเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งผ่านวงจรไม่ให้เปลี่ยนแปลง และเพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น พิจารณาตัวอย่างกรณีที่แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าและออกจากขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ขณะที่แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กจะกระทำต่อขดลวดเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีทิศทางที่ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กในทิศตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดเพื่อหักล้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ก)

แต่ในขณะที่นำแท่งแม่เหล็กออกจากขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวดจะมีค่าลดลง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลในทิศทางตรงข้ามกับกรณีแรก เพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กในทิศที่เสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำกับขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ข)



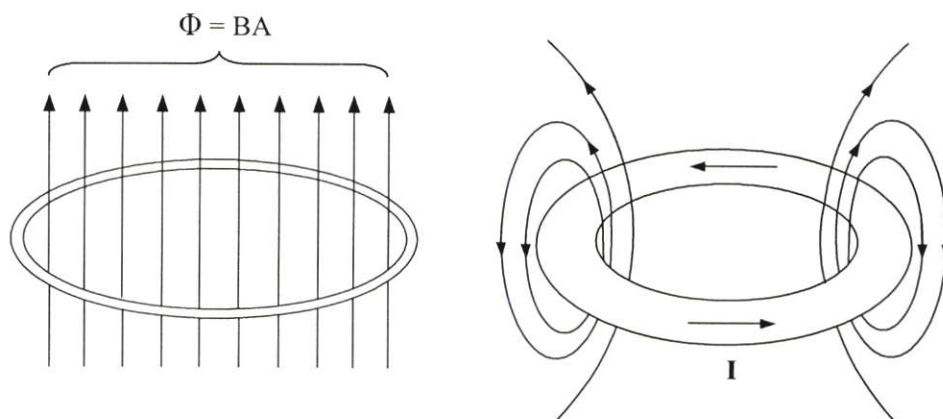
รูปที่ 2.16 แสดงทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจาก

ก) แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาลูปขดลวด

ข) แท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากลูปขดลวด

## 2.5 การเกิดกระแสคงสภาพและสนามแม่เหล็กคงที่ [15]

คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆนั้น จะประพฤติตัวเหมือนกับสารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic) กล่าวคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้านกับสนามแม่เหล็กภายนอก เพื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกสามารถทะลุผ่านเข้ามาในชิ้นสารได้โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law)



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิด Persistent current

และเมื่อพิจารณาถึงวงแหวนที่ทำจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสนามแม่เหล็ก ขณะที่นำสนามแม่เหล็กออกจากวงแหวน จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นไปตามกฎของเลนซ์ ดังนี้

$$-A \left( \frac{dB}{dt} \right) = IR + L \left( \frac{dI}{dt} \right) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 1.1 เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B = 0$ )

$$0 = IR + L \left( \frac{dI}{dt} \right) \quad (2.3)$$

$$\therefore I = I_0 e^{-Rt/L} \quad (2.4)$$

กรณีที่วงแหวนอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าความต้านทานเป็นศูนย์ ( $R = 0$ ) จะได้ว่า

$$I = I_0 \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า กระแสไฟฟ้าจะยังคงไหลอยู่ในวงแหวนคงที่ตลอดเวลา ซึ่งเรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent current) ขณะที่กระแสยังคงไหลในวงแหวน สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นด้วยค่าของ  $LI$  เมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กภายนอก จะได้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้น พุ่งผ่านวงแหวน สามารถแสดงดังสมการที่

$$\Phi = AB + LI \quad (2.6)$$

หาอนุพันธ์ของสมการ 2.6

$$\frac{d\Phi}{dt} = A \frac{dB}{dt} + L \frac{dI}{dt} \quad (2.7)$$

เปรียบเทียบสมการที่ 2.2 กับ 2.7 พบว่า

$$\frac{d\Phi}{dt} = -IR \quad (2.8)$$

ในกรณีที่ วงแหวนอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ( $R = 0$ ) ดังนั้น

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (2.9)$$

$\therefore \Phi = \text{Constant value}$

### บทที่ 3

## ผลของกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  (Gd-Ba-Cu-O) อันได้แก่ แรงอัดในการขึ้นรูปและอุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering ที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) และขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) โดยมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

### 3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O [16]

#### 3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลโคลิเนียม แบเรียม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลโคลิเนียม ออกไซด์ ( $Gd_2O_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $BaCO_3$ ) และคอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.9% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม  $Gd : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.1 พบว่า อัตราส่วนโดยอะตอมของสารประกอบจะได้  $Gd : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3

จากตารางธาตุ จะมีมวลอะตอมของธาตุต่างๆดังนี้  $Gd = 157.26$  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) $Gd_2O_3$ | 1 โมล             | ต้องเตรียมสาร = 362.49 กรัม  |
| ถ้า          | $\frac{1}{2}$ โมล | ต้องเตรียมสาร = 181.245 กรัม |
| 2) $BaCO_3$  | 1 โมล             | ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม |
| ถ้า          | 2 โมล             | ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม |
| 3) $CuO$     | 1 โมล             | ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม  |
| ถ้า          | 3 โมล             | ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม |

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

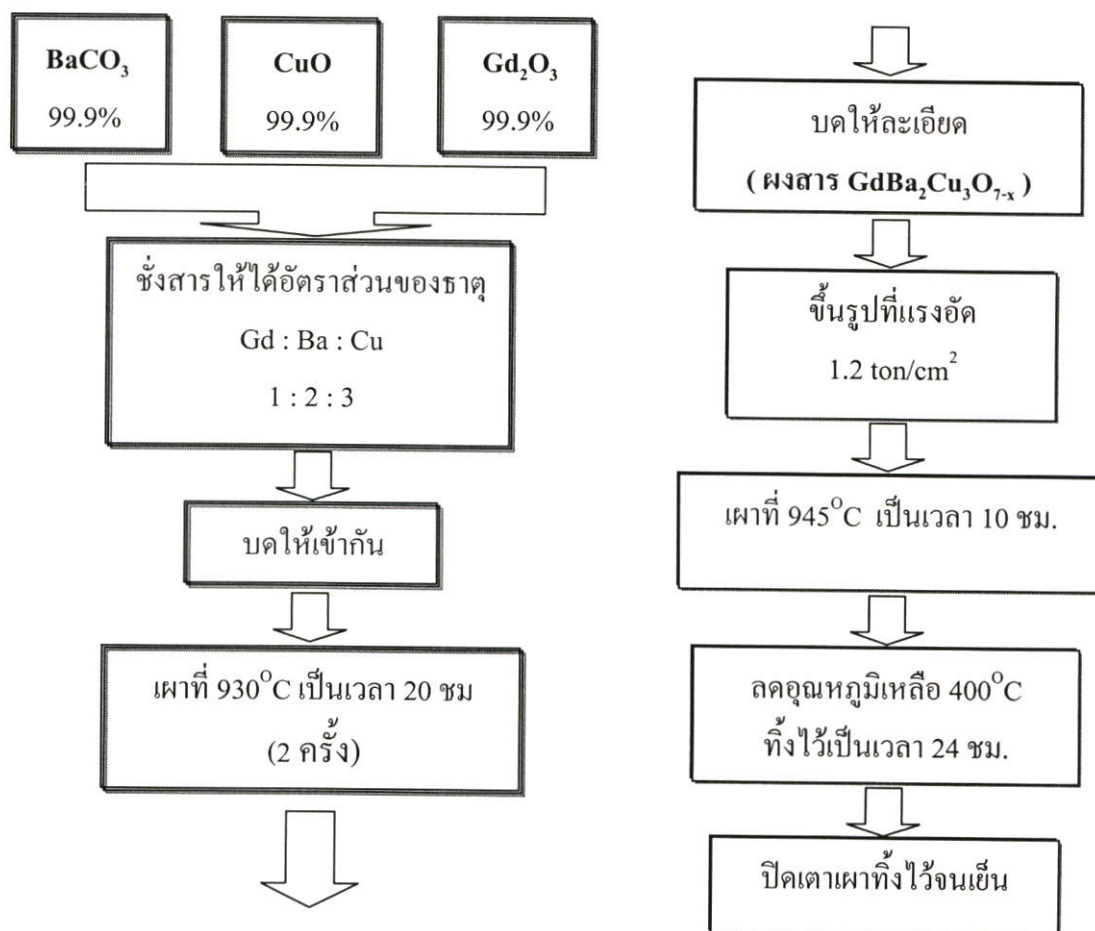
ซึ่งหมายความว่าให้ได้สาร  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  = 814.576 กรัม

จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

### 3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

ในขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ซึ่งมีกระบวนการสร้างดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ  $Gd_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  โดยใช้อัตราส่วน  $Gd : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $930^\circ C$  ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง เรียกการเผาในช่วงนี้ว่า การ Calcination เป็นการเผาเพื่อไล่คาร์บอนออกจากสารประกอบคาร์บอเนต โดยทำการ Calcination ทั้งหมด 2 ครั้ง ผงสารที่ผ่านการ Calcination ในครั้งแรก จะต้องนำมาบดให้ละเอียดก่อนนำไปทำการ Calcination ครั้งที่ 2
4. นำสารที่ผ่านการ Calcination มาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 1 กรัม ไปอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด  $1.2 \text{ ton/cm}^2$  ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. เม็ดสารที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $945^\circ C$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เรียกการเผาช่วงนี้ว่าการ Sintering เพื่อทำให้เนื้อสารมีการเชื่อมตัวตลอดทั้งชิ้นสาร
6. ลดอุณหภูมิลงครั้งละ  $100^\circ C$ /ชั่วโมง จนถึง  $400^\circ C$  อบอุ่นไว้อีก 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา



รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

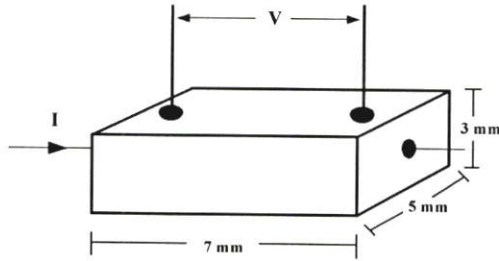
### 3.1.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลังจากที่ได้มีเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.1 มาแล้ว ต่อไปจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดสารเพื่อแสดงว่าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สมบูรณ์ดังนี้

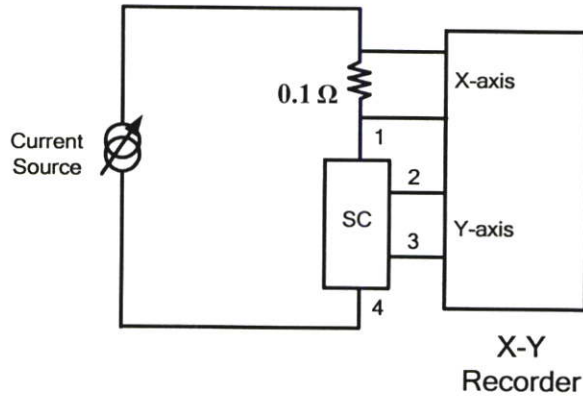
#### 3.1.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟตรงปรับค่าได้ (D.C. Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน Y ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน X จะใช้สำหรับวัดค่ากระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน  $0.1 \Omega$  จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

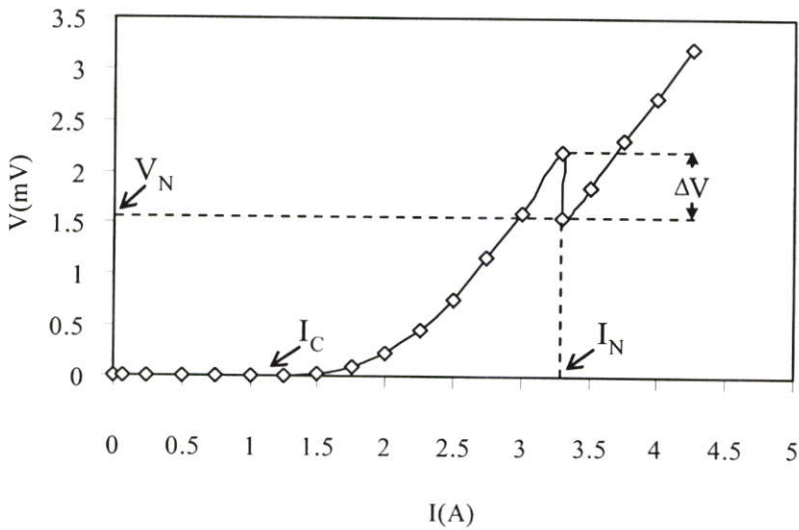
สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

ในรูปที่ 3.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ สำหรับความต้านทานเชิงลบที่วัดได้มีขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ( $\Delta V$ ) เท่ากับ 0.71 mV และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Current controlled negative resistance (CCNR) โดยที่  $I_c$  คือ ค่ากระแสวิกฤต

$V_N$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารที่มีค่าต่ำสุดภายหลังการเกิดความต้านทานเชิงลบ

$\Delta V$  คือ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ

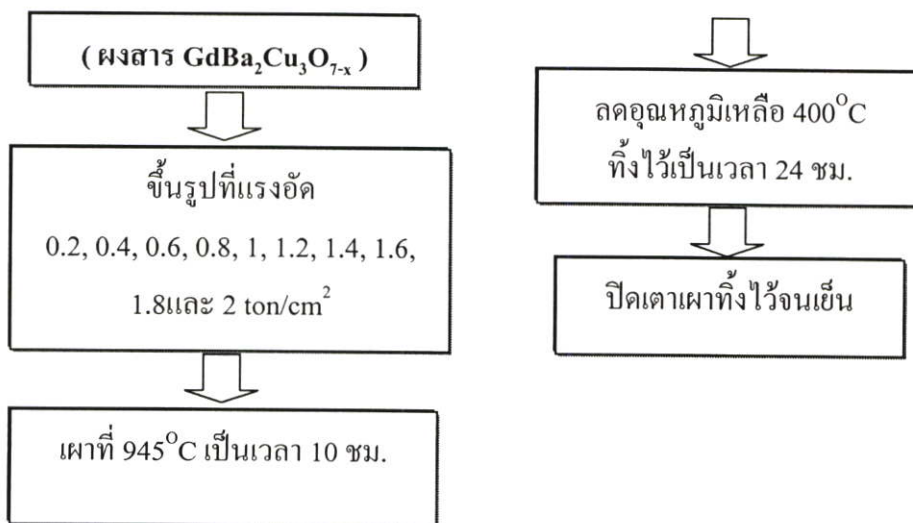
$I_N$  คือ ตำแหน่งกระแสขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ

### 3.2 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปในกระบวนการสร้างที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) ซึ่งในการทดลอง จะใช้แรงอัดในการขึ้นรูปในช่วง 0.2-2 ton/cm<sup>2</sup> เท่านั้นเพื่อป้องกันความเสียหายของบล็อก (Block) ที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

#### 3.2.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ

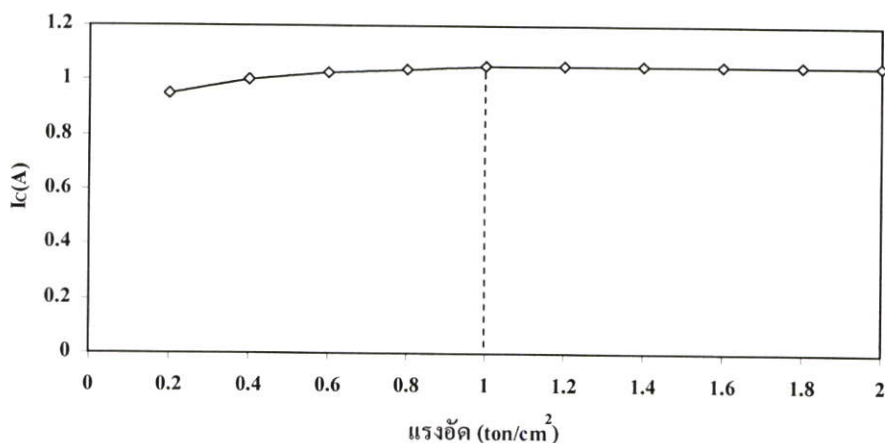
ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่แรงอัดค่าต่างๆ ดังนี้ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2 ton/cm<sup>2</sup> โดยมีขั้นตอนและกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดในการขึ้นรูป 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 และ 2 ton/cm<sup>2</sup>

### 3.2.2 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสวิกฤตกับแรงอัดค่าต่างๆ

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงแรงอัดค่าต่างๆที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต( $I_C$ ) จากผลการทดลองในรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ  $I_C$  กับค่าแรงอัดในการขึ้นรูป ซึ่งพบว่า แรงอัดในช่วง  $0.2 - 1 \text{ ton/cm}^2$  ค่าของ  $I_C$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ( $I_C = 0.95-1.05 \text{ A}$ ) และมีค่าคงที่ที่  $I_C = 1.05 \text{ A}$  เมื่อให้ค่าแรงอัดตั้งแต่  $1 \text{ ton/cm}^2$  ขึ้นไป



รูปที่ 3.6 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่แรงอัดค่าต่างๆ

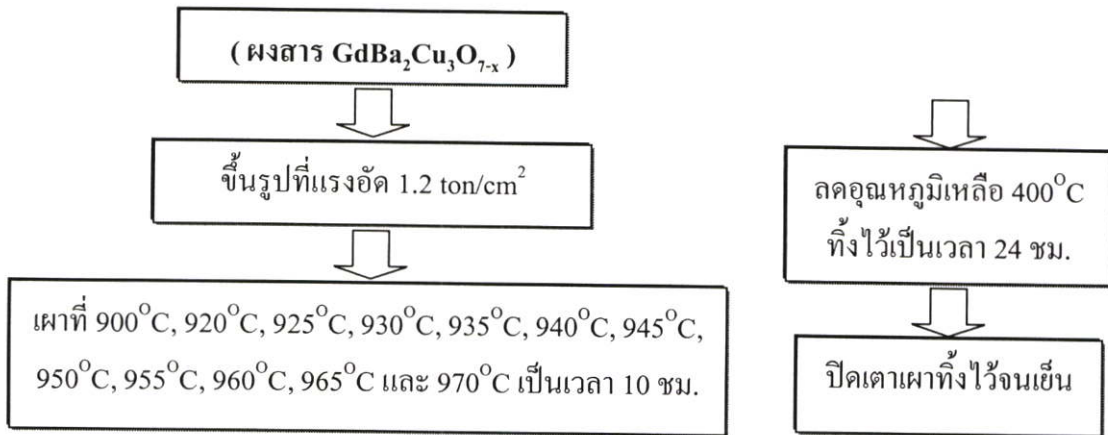
### 3.3 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

จากกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ามีช่วงของการเผาที่สำคัญอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงของการ Calcination และการ Sintering ในการ Calcination เป็นเพียงการเผาเพื่อไล่คาร์บอนออกจากสารประกอบคาร์บอนेट ซึ่งโดยทั่วไปสามารถใช้อุณหภูมิการเผาได้ในช่วง 900-940 องศาเซลเซียส [17]

สำหรับการ Sintering นั้น เป็นการเผาภายหลังการนำผงสารมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้ว ซึ่งอุณหภูมิการเผาในช่วงนี้มีผลโดยตรงกับสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากเป็นขั้นตอนการเผาเพื่อทำให้เนื้อสารมีการเชื่อมต่อกันตลอดทั้งชิ้นสารให้สมบูรณ์ การทดลองในหัวข้อนี้ จึงได้จัดเตรียมชิ้นสารที่ผ่านการ Sintering ที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

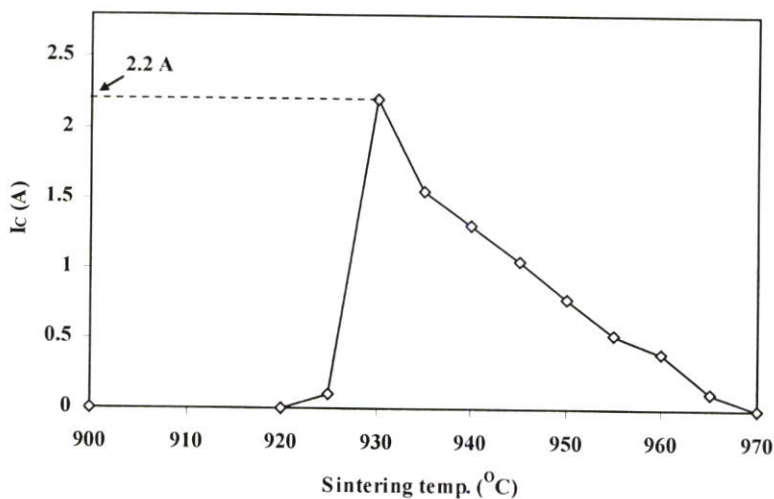
ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาในช่วงของการ Sintering ตั้งแต่ 900-970 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Sintering ค่าต่างๆ

### 3.3.2 ผลของอุณหภูมิการเผาต่อค่ากระแสวิกฤต

ในหัวข้อนี้ จะนำเอาชิ้นสารที่ผ่านกระบวนการสร้างจากหัวข้อ 3.3.1 มาวัดค่ากระแสวิกฤต ผลการทดลองที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเผาในช่วง 900-920 องศาเซลเซียส ไม่มีค่ากระแสวิกฤตและเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นเป็น 925 องศาเซลเซียส เริ่มมีกระแสวิกฤตเกิดขึ้น ( $I_c = 0.1$  A) และมีค่ากระแสวิกฤตสูงสุดที่  $I_c$  เท่ากับ 2.2 A ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงกว่า 930 องศาเซลเซียส ค่ากระแสวิกฤตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิการเผา 970 องศาเซลเซียส



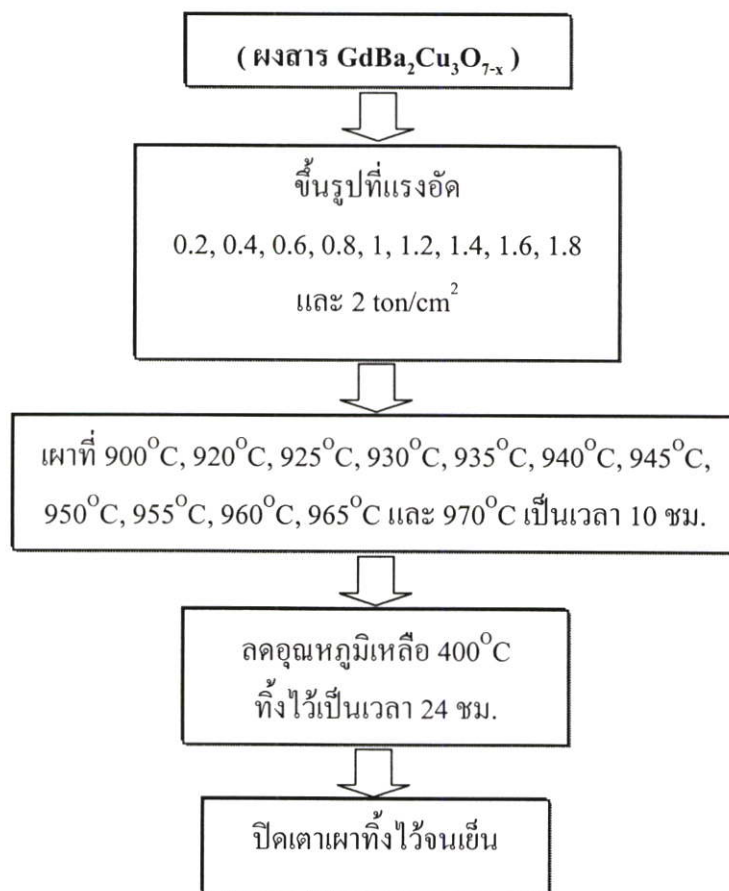
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสวิกฤตและอุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering

### 3.4 ผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผา 900-970 องศาเซลเซียส ที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

#### 3.4.1 การเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

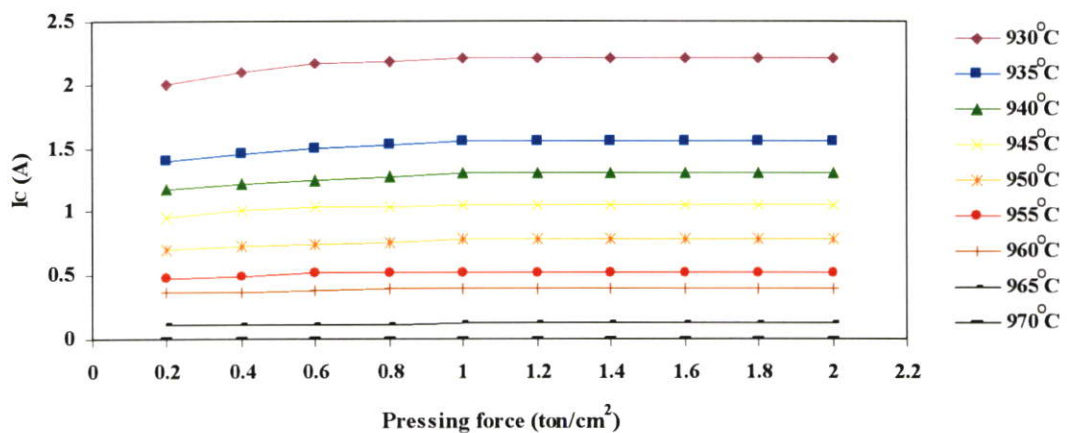
ในขั้นตอนแรกของการทดลองจะเป็นการเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีขั้นตอนกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.9 โดยเริ่มจากการนำผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ที่ได้เตรียมไว้ นำมาอัดขึ้นรูปด้วยแรงอัด 0.2-2 ton/cm<sup>2</sup> จากนั้นนำเม็ดสารทั้งหมดที่ได้แยกออกเป็นกลุ่มเพื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900-970 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400 องศาเซลเซียส อบทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดทำการปิดเตา



รูปที่ 3.9 กระบวนการสร้างเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

### 3.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นสารที่ผ่านแรงอัดและอุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ

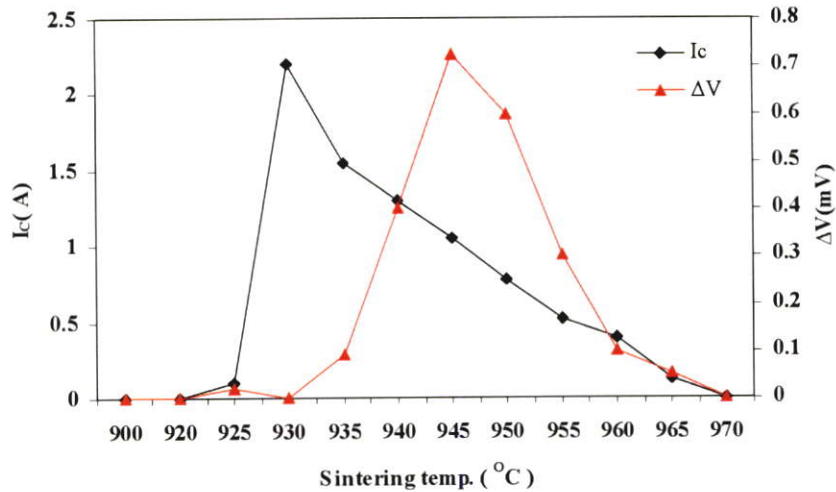
หลังจากที่ได้มีคัสสารที่ผ่านกระบวนการสร้างจากหัวข้อ 3.4.1 แล้ว นำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าอันได้แก่ ค่ากระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) สำหรับกราฟในรูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ เพื่อให้เห็นแนวโน้มของกราฟอย่างชัดเจน จึงพิจารณาอุณหภูมิการเผาเฉพาะในช่วง 930-960 องศาเซลเซียส ค่ากระแสวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรงอัด 0.2-1.0  $\text{ton/cm}^2$  และจะมีค่าคงที่เมื่อให้แรงอัดตั้งแต่ 1  $\text{ton/cm}^2$  ขึ้นไป ในส่วนของชั้นสารที่อุณหภูมิการเผา 965 องศาเซลเซียส กระแสวิกฤตจะมีค่าคงที่  $I_C$  เท่ากับ 0.12 A ทุกค่าแรงอัด



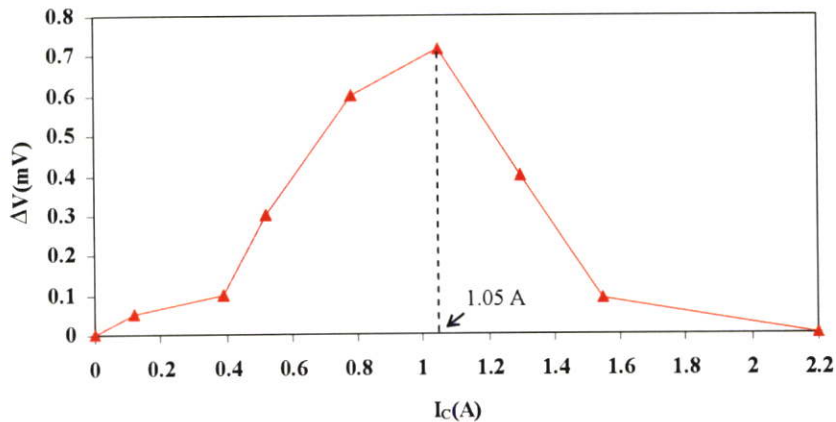
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับแรงอัดในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

จากผลการทดลองที่ได้ ที่แรงอัด 1.2  $\text{ton/cm}^2$  ก็มากพอที่จะใช้ในกระบวนการสร้าง เราจึงเลือกแรงอัดค่าดังกล่าวเป็นแรงอัดมาตรฐานของการทดลองต่อไป

จากกราฟในรูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤต ( $I_C$ ) กับ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) ที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ ที่แรงอัด 1.2  $\text{ton/cm}^2$  [18] ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะมีค่า  $I_C$  สูงสุด เท่ากับ 2.2 A แต่ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบไม่เกิดขึ้น ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบจะเกิดขึ้นเมื่อ  $I_C$  มีค่าต่ำกว่า 2.2 A และ  $\Delta V$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อชั้นสารมีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A ค่าของ  $\Delta V$  จะเป็นศูนย์ เมื่อชั้นสารเสียสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวด ( $I_C = 0$  A) ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับขนาดความต้านทานเชิงลบที่อุณหภูมิการเผาค่าต่างๆ (ที่แรงอัด 1.2 ตัน)



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความต้านทานเชิงลบกับค่ากระแสวิกฤต

จากกราฟในรูปที่ 3.11 และ 3.12 สามารถสรุปเป็นตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงค่าของ  $I_c$ ,  $J_c$  และ  $\Delta V$  ของชิ้นสารที่ผ่านแรงอัด 1.2 ton/cm<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิการเผาในช่วง 930 – 970 องศาเซลเซียส สำหรับการคำนวณค่า ความหนาแน่นกระแสวิกฤต ( $J_c$ ) สามารถคำนวณได้โดย นำค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ( $A_c$ ) เรียกการวัดค่า  $J_c$  โดยวิธีนี้ว่า Transport method [19] จากรูปที่ 3.2  $A_c$  มีค่าเท่ากับ 0.15 cm<sup>2</sup>

$$J_c = \frac{I_c}{A_c} \text{ A/cm}^2 \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าของ  $I_c$ ,  $J_c$  และ  $\Delta V$  ของชั้นสารที่แรงอัด  $1.2 \text{ ton/cm}^2$  ณ อุณหภูมิการเผาต่างๆ

Sintering Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Critical Current; $I_c$ (A)	Critical Current Density; $J_c$ ( $\text{A/cm}^2$ )	$\Delta V$ (mV)
930	2.2	14.66	0
935	1.55	10.33	0.09
940	1.3	8.66	0.4
945	1.05	7	0.71
950	0.78	5.2	0.6
955	0.52	3.46	0.3
960	0.39	2.6	0.1
965	0.12	0.8	0.05
970	0	0	0

### 3.5 สรุป

ในขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีปัจจัยหลักๆอยู่ 2 ประการ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือ

1. แรงอัดในการขึ้นรูป
2. อุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering

สำหรับผลของแรงอัดในการขึ้นรูป ที่แรงอัดตั้งแต่  $1 \text{ ton/cm}^2$  ขึ้นไป จะได้ค่ากระแสวิกฤตคงที่ในทุกๆอุณหภูมิการเผา

สำหรับผลของอุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) มีค่าสูงสุดที่ 2.2 A แต่พบว่าความต้านทานเชิงลบไม่เกิดขึ้น ปรากฏการณ์นี้จะเริ่มเกิดขึ้น เมื่อค่า  $I_c$  ต่ำกว่า 2.2 A ลงมา และขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน  $\Delta V$  สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.71 mV เกิดขึ้นเมื่อชั้นสารมีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.05 A ที่อุณหภูมิการเผา 945 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิการเผาในช่วง Sintering นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะสามารถที่จะนำไปควบคุมค่ากระแสวิกฤต( $I_c$ ) และค่า  $\Delta V$  ตามที่ต้องการได้ ถึงแม้ว่าค่าที่ได้นั้นจะยังอยู่ในช่วงกว้างๆ แต่ถ้าต้องการที่จะควบคุมค่ากระแสวิกฤต และค่า  $\Delta V$  ให้ละเอียดมากขึ้น เราสามารถควบคุมได้โดยใช้สนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะได้กล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

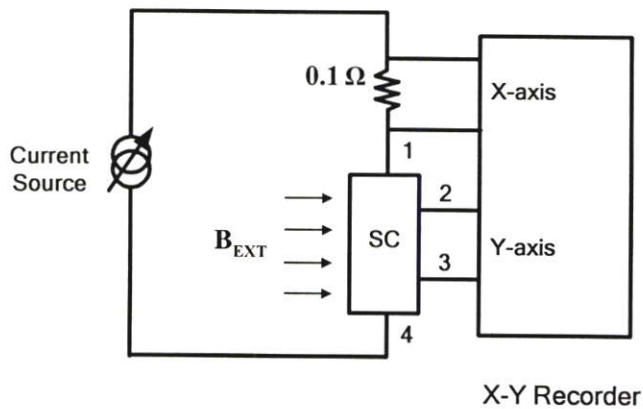
## บทที่ 4

# ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

### 4.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับ แรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ [18]

ในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอก( $B_{EXT}$ ) ที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง  
กระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดค่ากระแสวิกฤต( $I_C$ ) ต่างๆที่ได้จากกระบวนการสร้างในหัวข้อ  
3.4.2 ตารางที่ 3.1 มาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 4.1
2. ทำการหล่อเย็นชิ้นสารด้วยไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิ 77 เคลวิน จากนั้นให้สนามแม่เหล็ก  
ภายนอก( $B_{EXT}$ ) ค่าต่างๆแก่ชิ้นสารในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ  
ชิ้นสาร
3. ป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารเพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



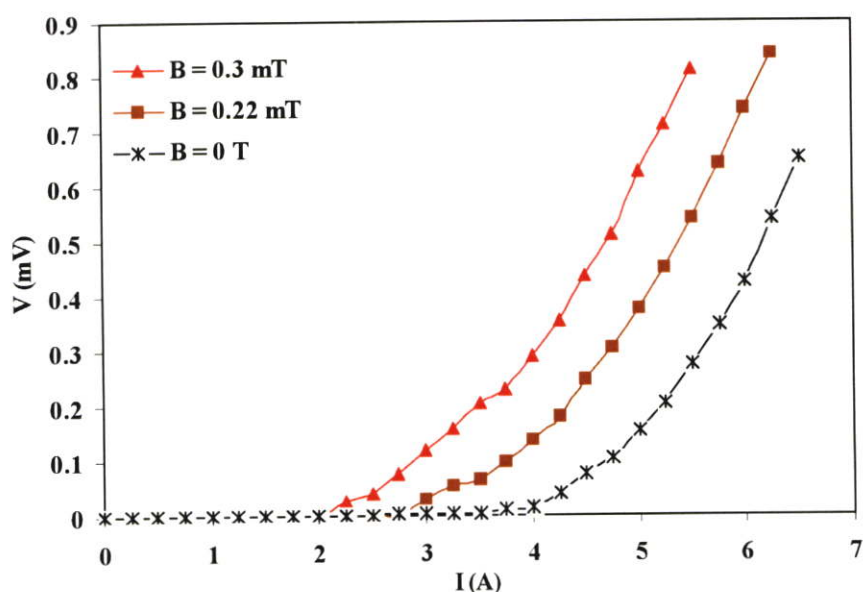
รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก

การนำชิ้นสารมาหล่อเย็นเพื่อให้อยู่ในสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะให้สนามแม่เหล็ก  
ภายนอก เรียกวิธีการนี้ว่า Zero-field cooling (ZFC) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวัดผลของ  
สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากถ้าให้สนามแม่เหล็กแก่ชิ้นสารก่อนการ

หล่อเย็น (Field cooling; FC) ผลการทดลองที่ได้อาจผิดพลาดได้จากผลของ Defect ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในชิ้นสาร

#### 4.1.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 2.2$ A

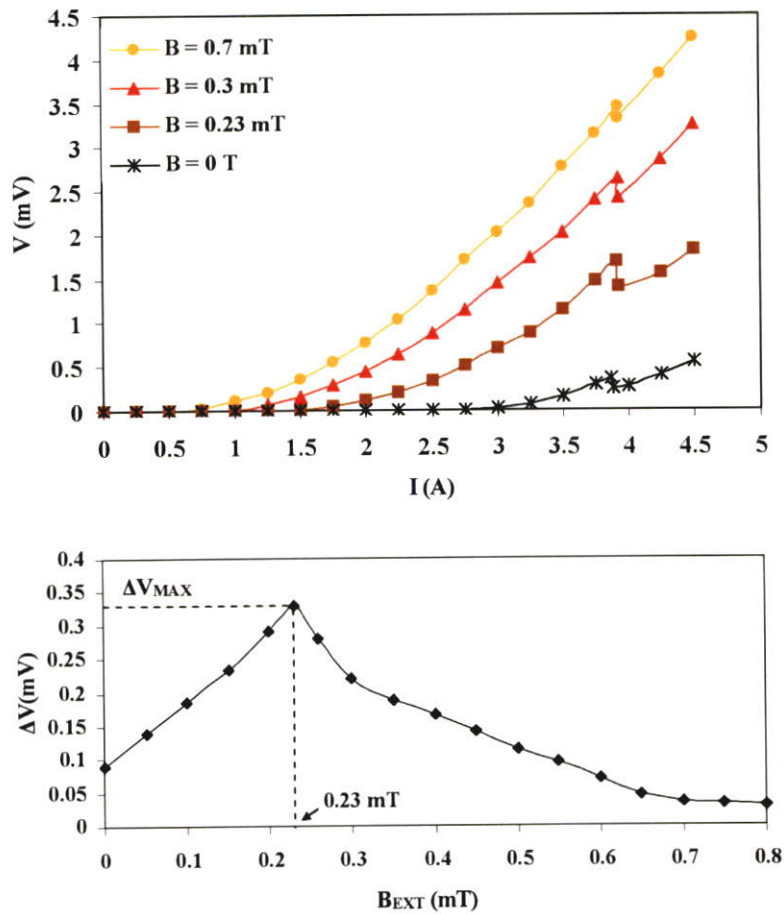
จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.4.2 แสดงให้เห็นว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 2.2 A เป็นชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  สูงสุด แต่ไม่พบปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ จากกราฟในรูปที่ 4.2 แสดงถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลโดยตรงต่อค่ากระแสวิกฤต กล่าวคือ เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสวิกฤตจะลดลง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่มีค่า  $I_c = 2.2$  A ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก

#### 4.1.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.55$ A

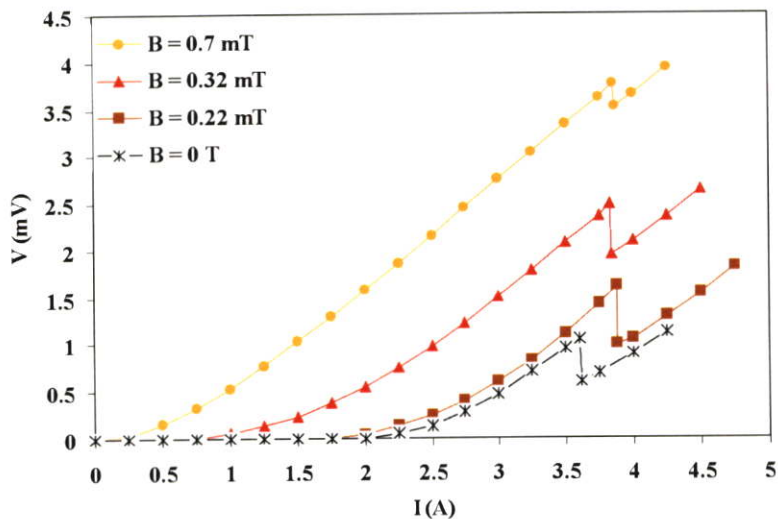
สำหรับชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.55 A จากกราฟผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า นอกจากค่าสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อค่ากระแสวิกฤตแล้ว ยังมีผลต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) ด้วย กล่าวคือ ถ้าให้สนามแม่เหล็กในช่วง 0-0.23 mT  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 0.23 mT ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V$  สูงสุด ( $\Delta V_{MAX}$ ) เท่ากับ 0.33 mV



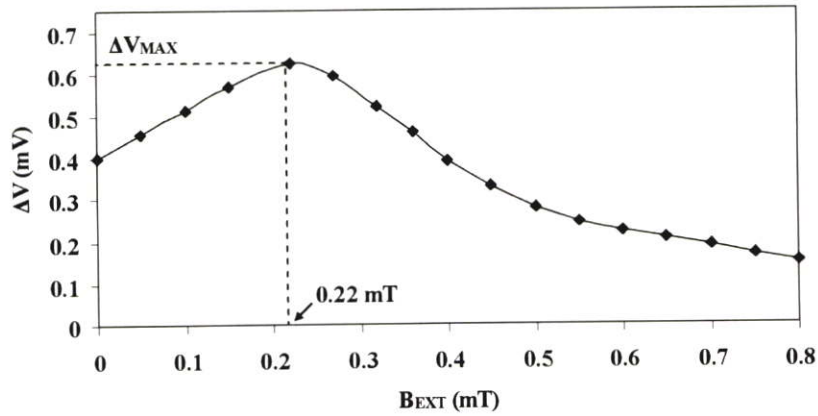
รูปที่ 4.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_c = 1.55$  A

#### 4.1.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.3$ A

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารในช่วง 0-0.22 mT ค่าของ  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้ค่าสนามแม่เหล็กเกินกว่า 0.22 mT ค่าของ  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.625 mV



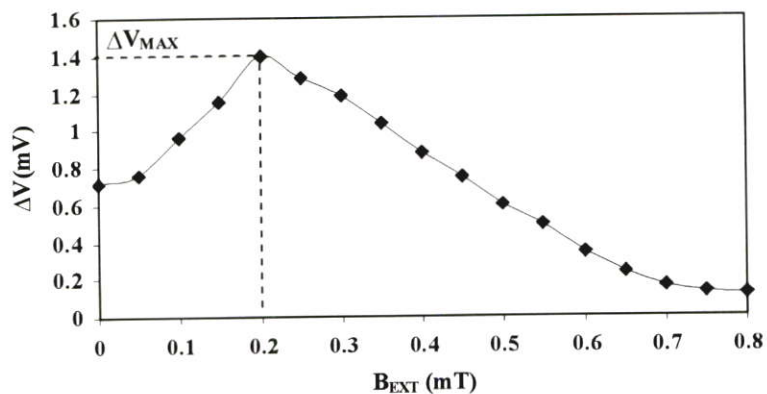
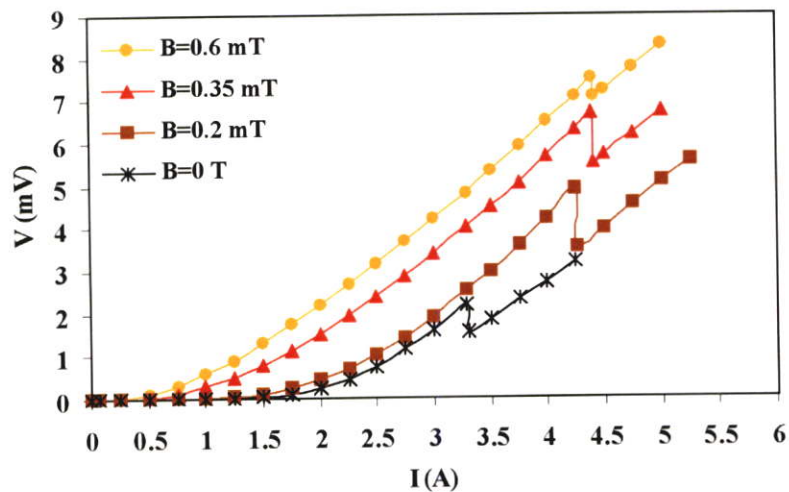
รูปที่ 4.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_c = 1.3$  A



รูปที่ 4.4 (ต่อ)

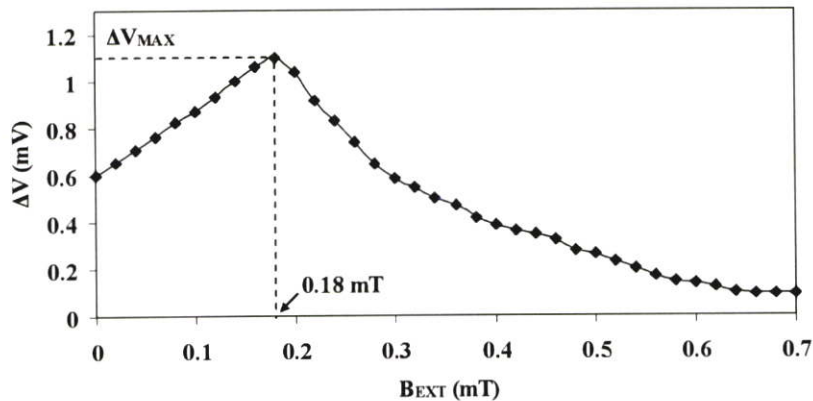
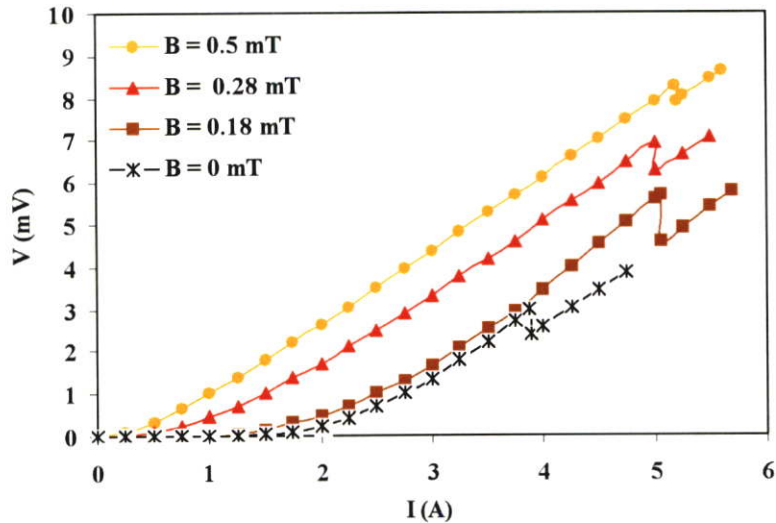
#### 4.1.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 1.05$ A

จากผลการทดลองที่ 3.4.2 แสดงให้เห็นว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05$  A จะมีค่า  $\Delta V$  สูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตอื่นๆ จากการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกก็เช่นกันเมื่อให้  $B_{EXT}$  ในช่วง 0-0.2 mT จะทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้นและเมื่อให้  $B_{EXT}$  เกินกว่า 0.2 mT ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 1.4 mV ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05$  A

#### 4.1.5 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.78$ A

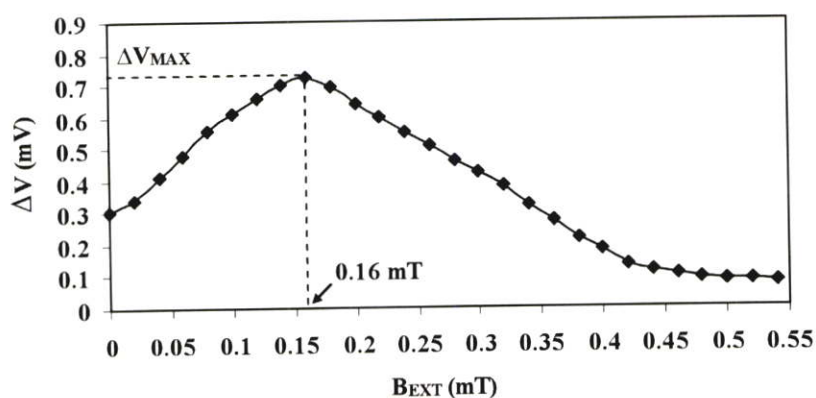
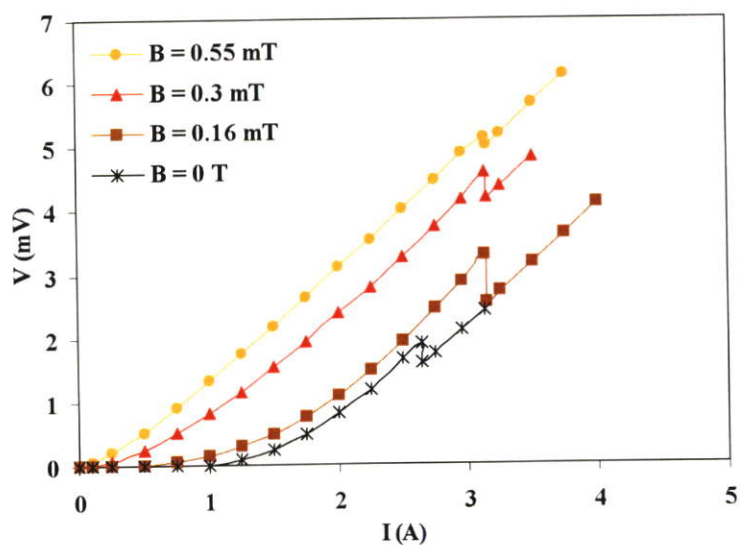
สำหรับชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.78 A สนามแม่เหล็กยังคงมีผลต่อทั้งค่ากระแสวิกฤตและค่าของ  $\Delta V$  โดยที่ค่าของ  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถ้าให้  $B_{EXT}$  ในช่วง 0-0.18 mT ซึ่งมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 1.1 mV และค่า  $\Delta V$  จะลดลงเมื่อให้สนามแม่เหล็กสูงกว่าช่วงนี้



รูปที่ 4.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 0.78$  A

#### 4.1.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.52$ A

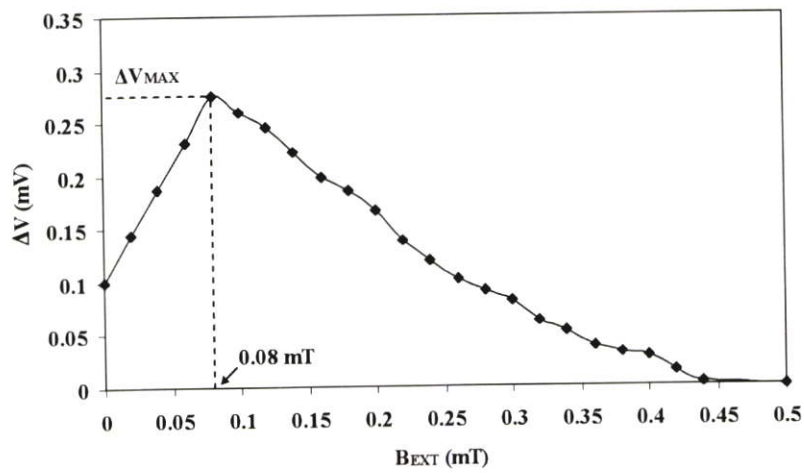
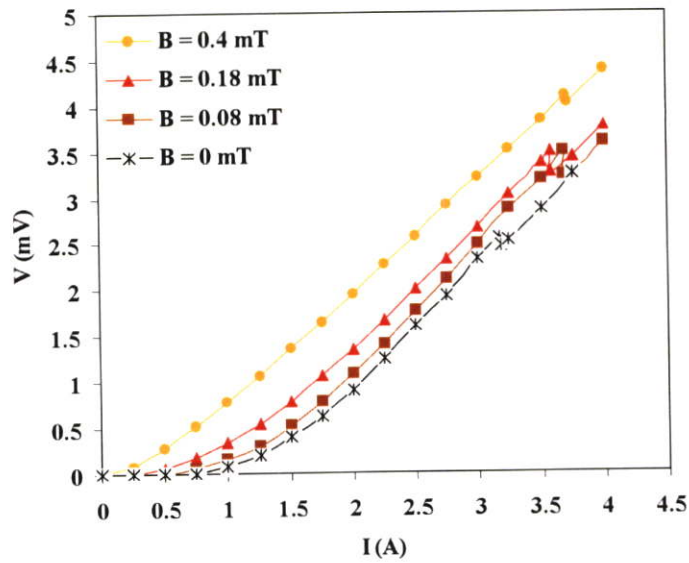
จากกราฟในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อให้ค่า  $B_{EXT}$  ในช่วง 0-0.16 mT ค่า  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้  $B_{EXT}$  เกินกว่าค่านี้  $\Delta V$  จะมีค่าลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.72 mV



รูปที่ 4.7 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 0.52$  A

#### 4.1.7 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39$ A

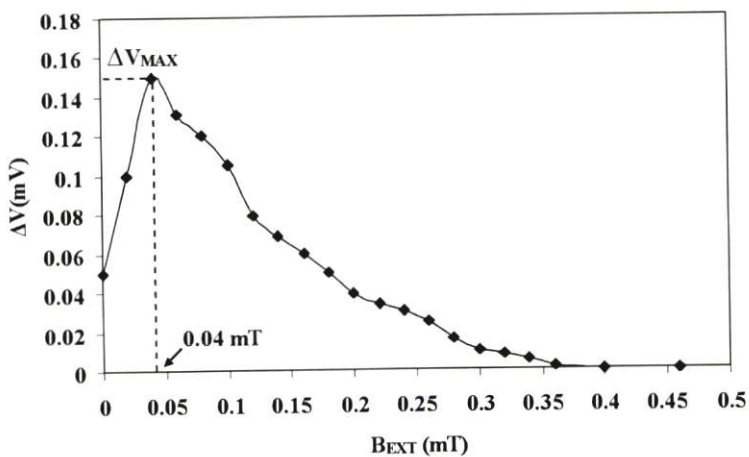
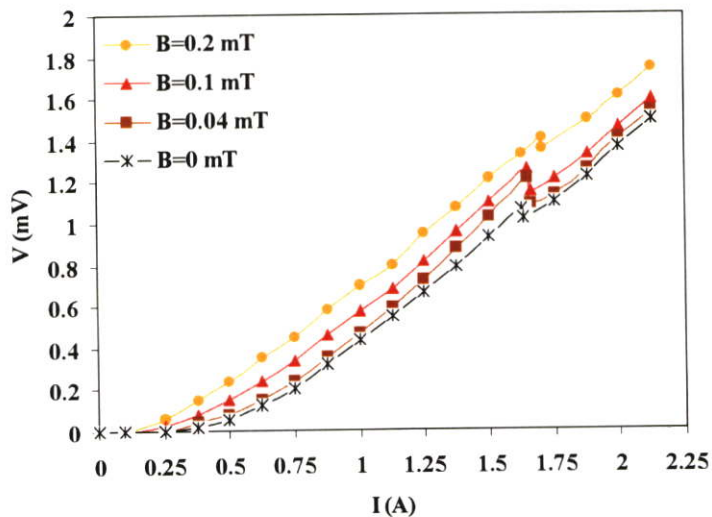
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 เมื่อให้  $B_{EXT}$  ในช่วง 0-0.08 mT แก่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.39 A จะทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้  $B_{EXT}$  เกินกว่าค่านี้ จะส่งผลให้ค่า  $\Delta V$  ลดลง สำหรับ  $\Delta V_{MAX}$  มีค่าเท่ากับ 0.275 mV



รูปที่ 4.8 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_c = 0.39$  A

#### 4.1.8 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 0.12$ A

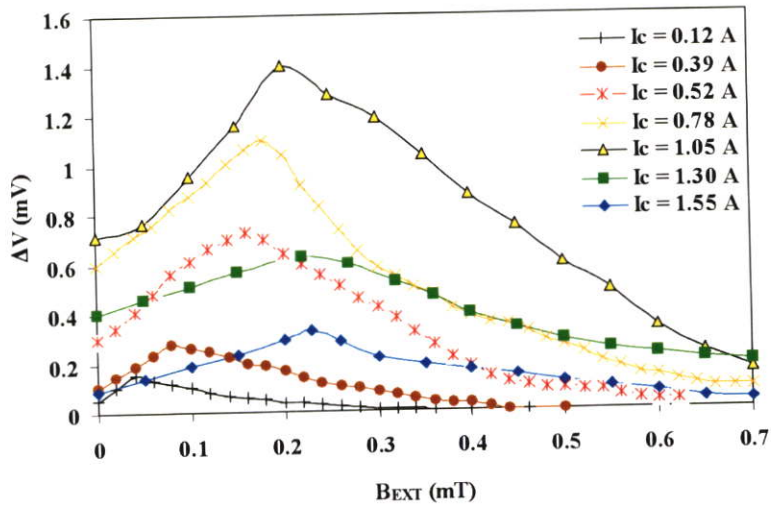
สำหรับชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 0.12 A ซึ่งเป็นค่า  $I_c$  ต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง จากกราฟในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้  $B_{EXT}$  ในช่วง 0-0.04 mT ค่า  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้  $B_{EXT}$  เกินกว่านี้ ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.15 mV



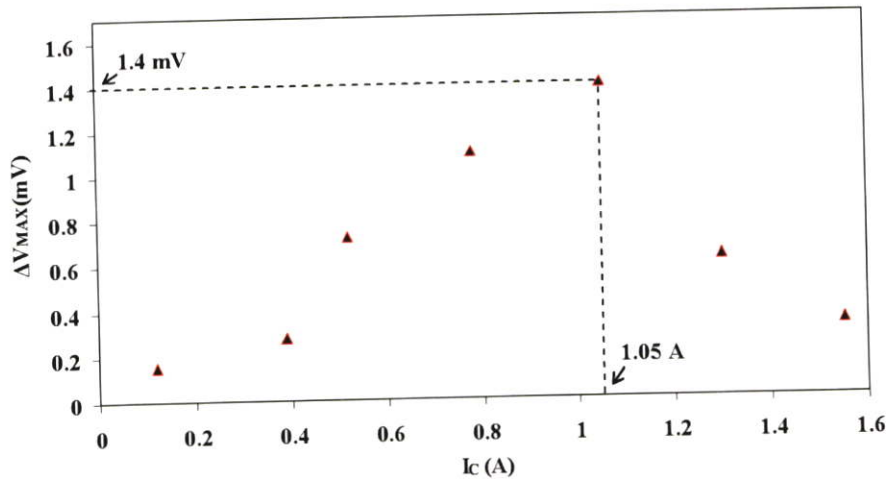
รูปที่ 4.9 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_c = 0.12$  A

จากผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 4.1.1-4.1.8 สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) กับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิง ลบ ( $\Delta V$ ) ของชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเห็นได้ว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.05 A มีค่า  $\Delta V_{MAX}$  ที่สูงกว่าชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

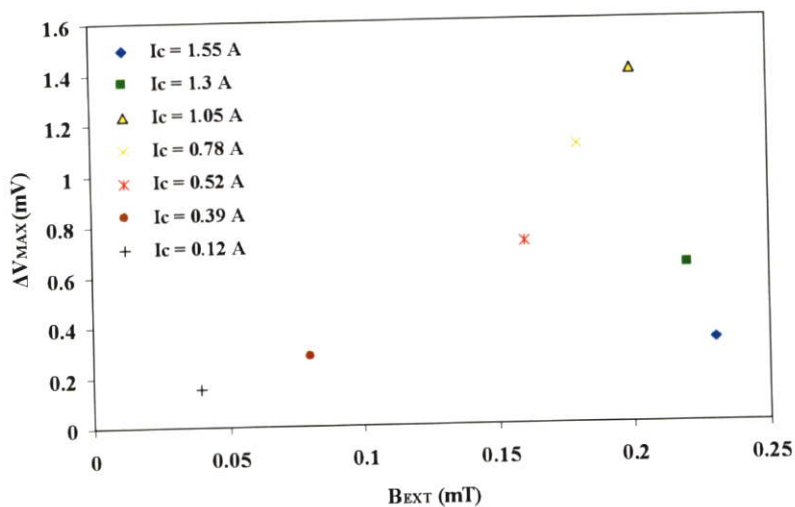
เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของ  $\Delta V_{MAX}$  กับ  $B_{EXT}$  พบว่า ค่า  $\Delta V_{MAX}$  จะเกิดขึ้นเมื่อให้ค่า  $B_{EXT}$  ที่เหมาะสม และยังพบอีกว่า ชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  สูง จะต้องให้  $B_{EXT}$  มากกว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่ำ  $\Delta V_{MAX}$  จึงจะเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับขนาดความต้านทานเชิงลบของชั้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_c$  กับ  $\Delta V_{MAX}$



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{EXT}$  กับ  $\Delta V_{MAX}$  ของชั้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมค่าของ  $\Delta V$  ของซินซาร์ที่มีค่า  $I_C$  ต่างๆ ให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) แก่ซินซาร์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** สรุปผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ที่มีต่อค่า  $\Delta V$  ของซินซาร์ที่มี  $I_C$  ค่าต่างๆ

ซินซาร์ที่มีค่า $I_C$ (A)	ค่าของ $\Delta V$ ในช่วงต่างๆ (mV)	สนามแม่เหล็กภายนอก, $B_{EXT}$ (mT)
1.55	$\Delta V \uparrow = 0.09 - 0.33$	0 - 0.23
	$\Delta V \downarrow \leq 0.33$	$\geq 0.23$
1.3	$\Delta V \uparrow = 0.4 - 0.625$	0 - 0.22
	$\Delta V \downarrow \leq 0.625$	$\geq 0.22$
1.05	$\Delta V \uparrow = 0.71 - 1.4$	0 - 0.2
	$\Delta V \downarrow \leq 1.4$	$\geq 0.2$
0.78	$\Delta V \uparrow = 0.6 - 1.1$	0 - 0.18
	$\Delta V \downarrow \leq 1.1$	$\geq 0.18$
0.52	$\Delta V \uparrow = 0.3 - 0.72$	0 - 0.16
	$\Delta V \downarrow \leq 0.72$	$\geq 0.16$
0.39	$\Delta V \uparrow = 0.1 - 0.275$	0 - 0.08
	$\Delta V \downarrow \leq 0.275$	$\geq 0.08$
0.12	$\Delta V \uparrow = 0.05 - 0.15$	0 - 0.04
	$\Delta V \downarrow \leq 0.15$	$\geq 0.04$

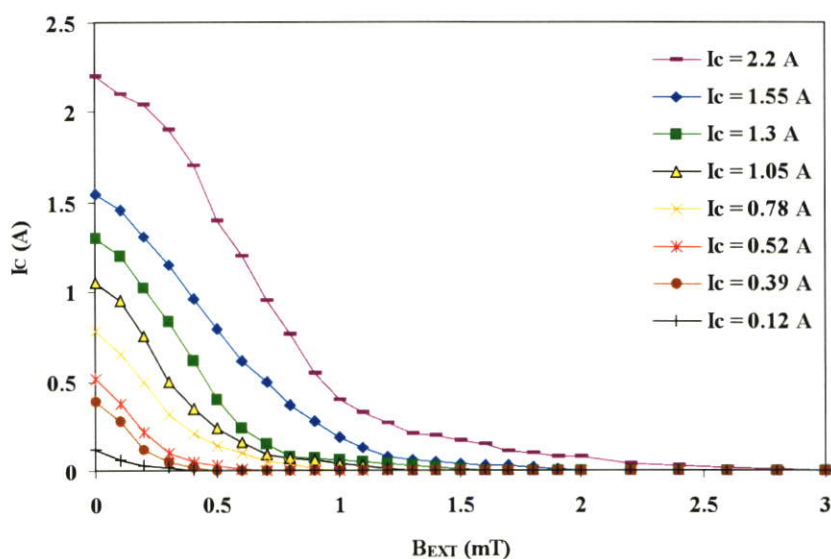
$\Delta V \uparrow$  คือ ค่าของ  $\Delta V$  ในช่วงที่เพิ่มขึ้น

$\Delta V \downarrow$  คือ ค่าของ  $\Delta V$  ในช่วงที่ลดลง

#### 4.1.9 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต

ในส่วนผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของซินซาร์ที่มีค่ากระแสวิกฤต ( $I_C$ ) ต่างๆ สามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กมีผลทำให้ค่ากระแสวิกฤตนั้นลดลง โดยที่ซินซาร์ที่มีค่า  $I_C$  สูง ต้องให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่ามากกว่าซินซาร์ที่มี  $I_C$  ต่ำกว่า จึงจะทำให้ซินซาร์นั้นเสียดสภาพอย่างสมบูรณ์ (ดูได้จากค่า  $I_C$  มีค่าเป็นศูนย์)

โดยที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ทำให้ชั้นสารนั้นเสียสภาพการนำไฟฟ้าฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต ( $B_c$ ) สำหรับค่า  $B_c$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่างๆ ดูได้จากตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 ผลของ  $B_{EXT}$  ที่มีต่อชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ค่า  $B_c$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่างๆ

ชั้นสารที่มีค่า $I_c$ (A)	สนามแม่เหล็กวิกฤต ( $B_c$ ) (mT)
2.2	3.1
1.55	2.5
1.3	2.3
1.05	2.1
0.78	1.7
0.52	1.4
0.39	1.2
0.12	0.9

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  สูงจะมีค่า  $B_c$  ที่สูงด้วยเช่นกัน เนื่องจากชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ที่สูงจะมีสภาพนำไฟฟ้าฟ้ายิ่งยวดที่สมบูรณ์กว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่ำ ดังนั้นการที่จะทำลายสภาพนำไฟฟ้าฟ้ายิ่งยวดจึงต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงด้วยเช่นกัน

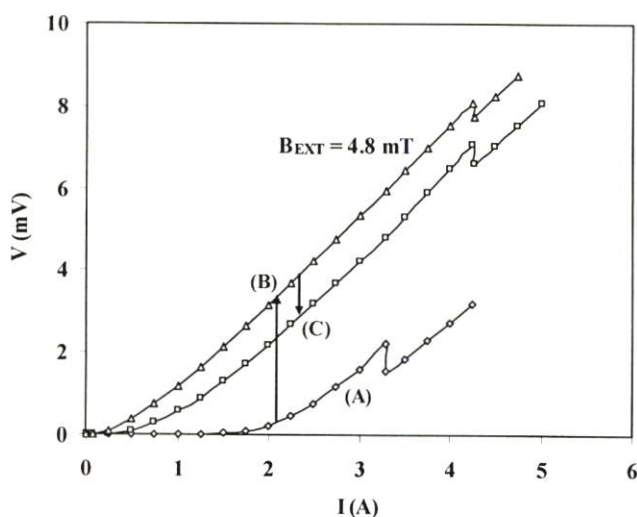
## 4.2 สภาวะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

สภาวะการจำแม่เหล็กเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [20] โดยสภาวะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงมากพอแก่ฉนวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป จะยังคงมีเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากฉนวนอย่างต่อเนื่อง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของสภาวะการจำแม่เหล็กที่มีต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) [21], [22] ของฉนวนที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ โดยวงจรที่ใช้ในการทดลองยังคงเป็นวงจรในรูปที่ 4.1

### 4.2.1 สภาวะการจำแม่เหล็กในฉนวนที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.05$ A

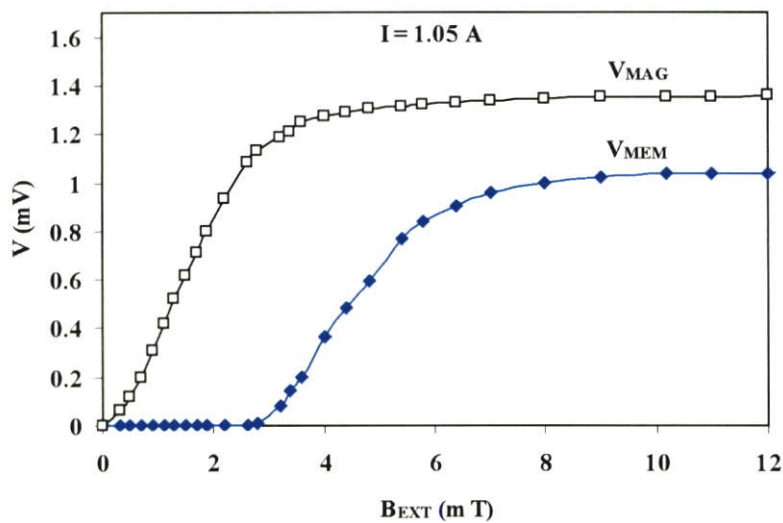
สภาวะการจำแม่เหล็กสามารถที่จะสังเกตได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 สำหรับกราฟ(A) เป็นการวัดในขณะที่ยังไม่ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อป้อนสนามแม่เหล็ก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 4.8 mT แก่ฉนวน กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นดังกราฟ (B) หลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไป กราฟจะไม่ย้อนกลับมายังกราฟ (A) แต่จะค้างอยู่ที่กราฟ(C) เมื่อลดกระแสที่จ่ายให้กับฉนวนลงเป็นศูนย์ และจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ถ้ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ยังคงเป็นเช่นเดียวกับกราฟ(C) นั้นแสดงว่า ฉนวนอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ที่แสดงผลการจำแม่เหล็กของฉนวน  $I_C = 1.05$  A

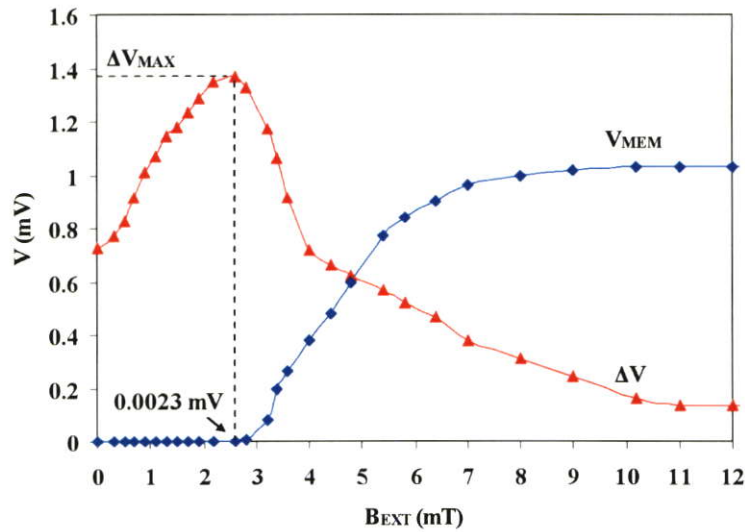
รูปที่ 4.15 แสดงสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆที่มีผลต่อสถานะการจำแม่เหล็กของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A ในการทดลอง เริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารคงที่เท่ากับค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสาร ( $I = 1.05A$ ) จากนั้นป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ให้แก่ชิ้นสาร สัญลักษ์ณ์  $V_{MAG}$  เป็นแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กภายนอก  $V_{MEM}$  เป็นแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในขณะที่อยู่ในสถานะการจำแม่เหล็ก โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MAG}$  กับ  $B_{EXT}$  ถูกวัดในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MEM}$  กับ  $B_{EXT}$  ถูกวัดหลังจากที่นำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว

จากผลการทดลองพบว่า ถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกน้อยกว่า 1.5 mT แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว ( $V_{MEM}$ ) จะมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือยังไม่เกิดการจำแม่เหล็กขึ้น แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กเกินกว่าค่านี้ ชิ้นสารจะเกิดการจำแม่เหล็กขึ้น โดยสังเกตได้จาก  $V_{MEM}$  จะเริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น และ  $V_{MEM}$  จะเริ่มเข้าสู่สถานะอิ่มตัว ที่ค่าสนามแม่เหล็กประมาณ 10 mT



รูปที่ 4.15 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการจำแม่เหล็กของชิ้นสาร  $I_C = 1.05$  A

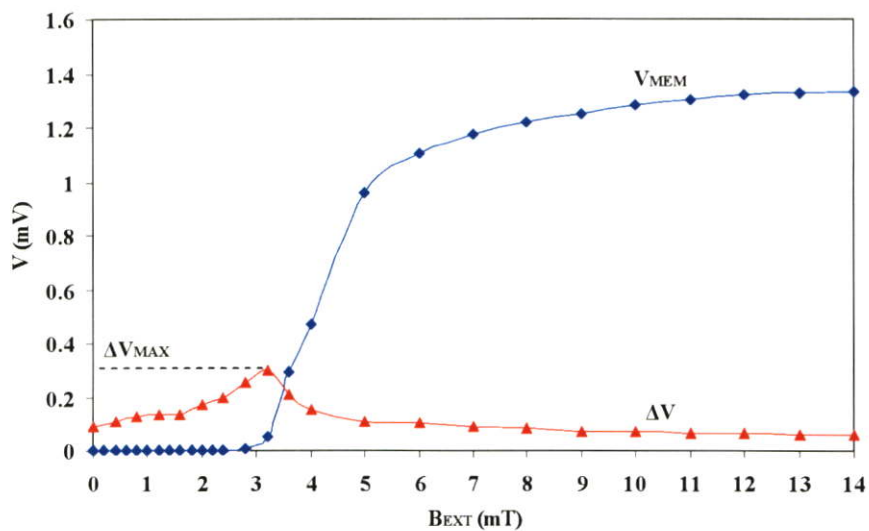
กราฟในรูปที่ 4.16 แสดงผลการจำแม่เหล็กที่มีต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) โดยที่กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ถูกวัดหลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว ชิ้นสารเมื่ออยู่ในสถานะการจำแม่เหล็กค่าต่างๆ  $V_{MEM} \leq 0.0023$  mV จะมีผลทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น แต่ถ้า  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่า 0.0023 mV ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 1.37 mV



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05$  A

#### 4.2.2 สภาวะการจำแม่เหล็กในชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.55$ A

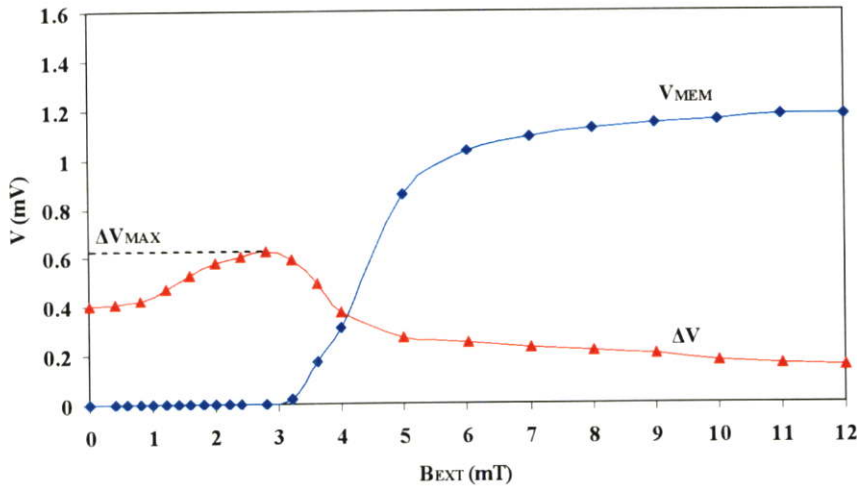
ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.55 A จะเริ่มจำแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่า 1.6 mT และเริ่มเข้าสู่สภาวะอิมิตัว เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 14 mT ที่สภาวะการจำแม่เหล็กค่าต่ำๆ  $V_{MEM} \leq 0.0513$  mV จะมีผลทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มมากขึ้นแต่ถ้า  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่านี้ ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.31 mV ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.55$  A

#### 4.2.3 ภาวะการจำแม่เหล็กในซินสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 1.3\text{A}$

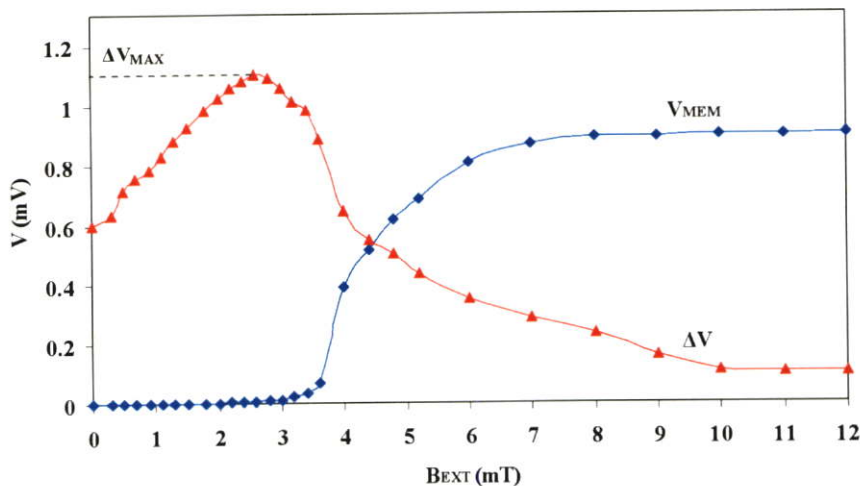
สภาวะการจำแม่เหล็กของซินสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ  $1.3\text{ A}$  จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกมากกว่า  $1.6\text{ mT}$  และจะเริ่มเข้าสู่สภาวะอิมตัว เมื่อให้สนามแม่เหล็กเท่ากับ  $12\text{ mT}$  จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ที่สภาวะการจำแม่เหล็กค่าต่ำๆ  $V_{MEM} \leq 0.01\text{ mV}$  ส่งผลให้  $\Delta V$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้า  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่านี้ ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ  $0.61\text{ mV}$



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของซินสารที่มีค่า  $I_C = 1.3\text{ A}$

#### 4.2.4 สภาวะการจำแม่เหล็กในซินสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.78\text{ A}$

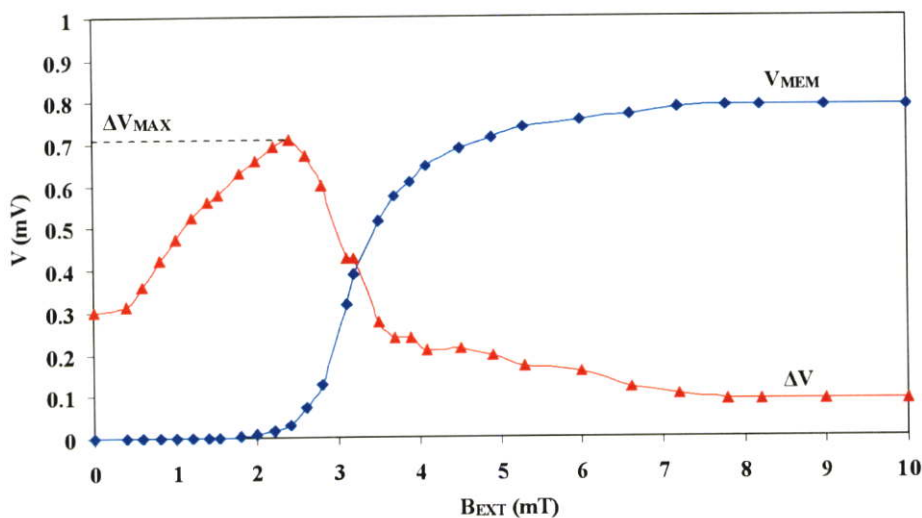
สำหรับซินสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ  $0.78\text{ A}$  จะเข้าสู่สภาวะการจำแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่  $1.3\text{ mT}$  ขึ้นไป ในช่วงของการจำแม่เหล็กค่าต่ำๆ  $V_{MEM} \leq 0.0072\text{ mV}$  ค่าของ  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้นและถ้า  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่านี้ ค่า  $\Delta V$  จะลดลง โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ  $1.09\text{ mV}$



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของซินสารที่มีค่า  $I_C = 0.78\text{ A}$

#### 4.2.5 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.52$ A

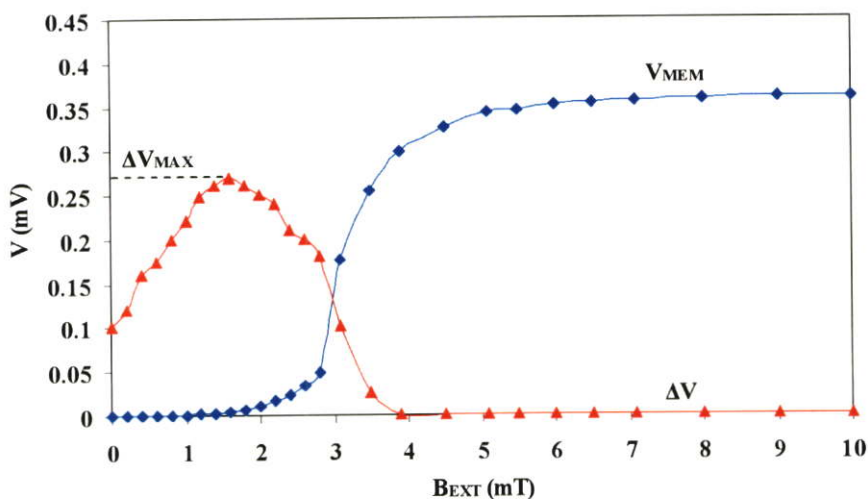
ชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.52 A จะเข้าสู่สถานะการจำแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่ 1 mT ขึ้นไป และ  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อชั้นสารอยู่ในช่วงของการจำแม่เหล็กค่าต่างๆ  $V_{MEM} \leq 0.0282$  mV โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.71 mV ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_C = 0.52$  A

#### 4.2.6 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_C = 0.39$ A

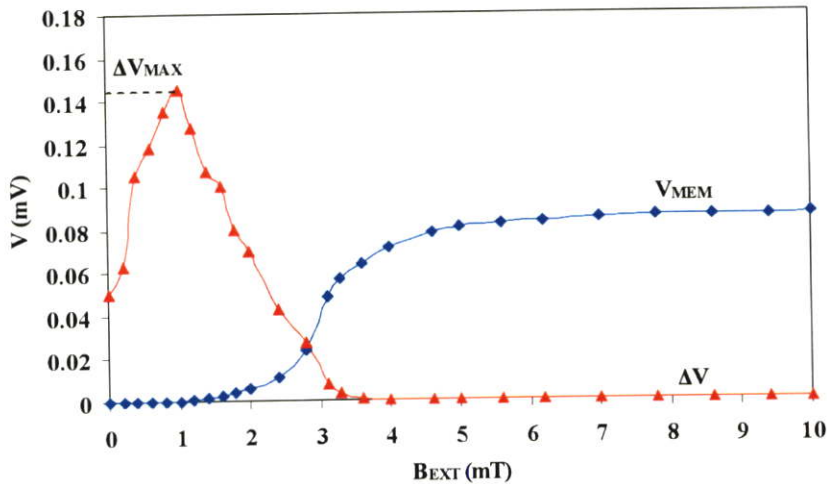
ชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.39 A จะเริ่มเข้าสู่สถานะการจำแม่เหล็กเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกตั้งแต่ 0.8 mT ขึ้นไปและค่า  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $V_{MEM} \leq 0.0035$  mV ค่า  $\Delta V$  จะเริ่มลดลงเมื่อ  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่าค่านี้ โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.27 mV ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_C = 0.39$  A

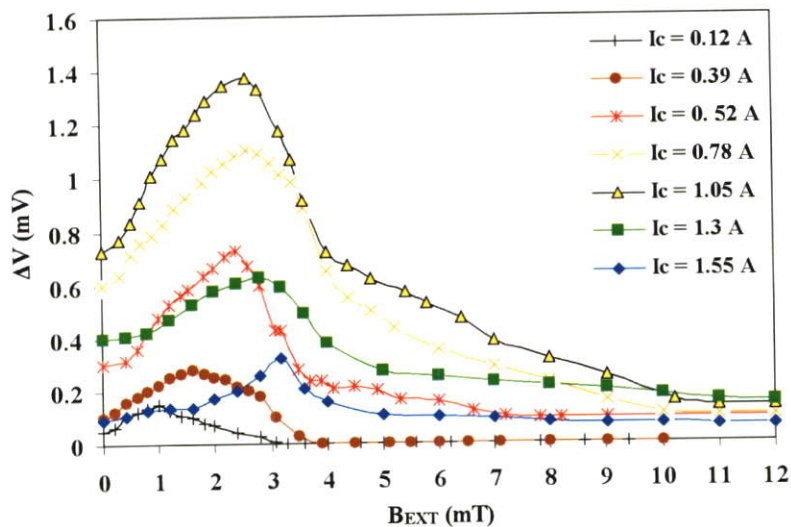
#### 4.2.7 สถานะการจำแม่เหล็กในชั้นสารที่มีกระแสวิกฤต $I_c = 0.12$ A

สำหรับชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 0.12 A จะต้องให้ค่าสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0.7 mT จึงจะเกิดสถานะการจำแม่เหล็กขึ้น ค่า  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อชั้นสารมีการจำแม่เหล็กในช่วง  $V_{MEM} \leq 0.0004$  mV โดยมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  เท่ากับ 0.145 mV ดังแสดงในรูปที่ 4.22

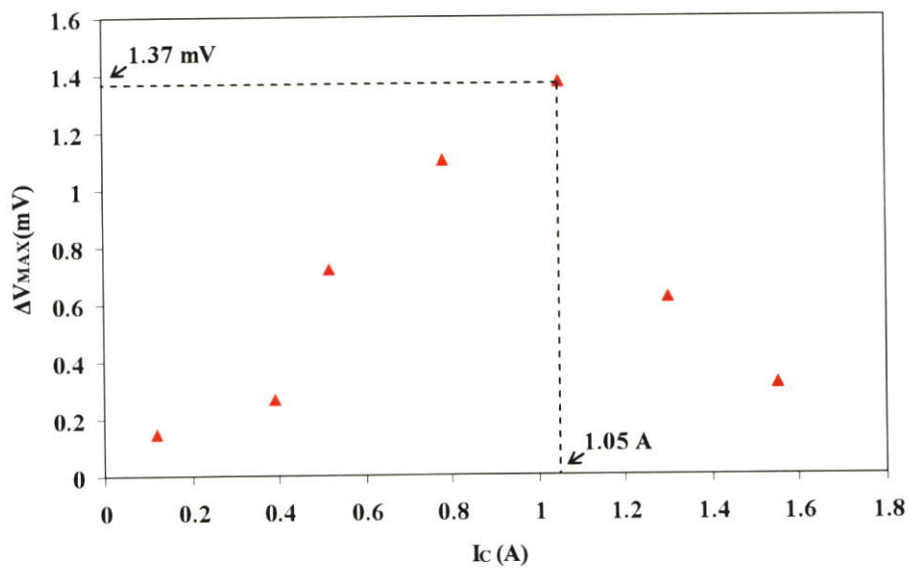


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของ  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  และ  $B_{EXT}$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_c = 0.12$  A

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อ 4.2.1-4.2.7 สามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกกับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบของชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.05 A จะมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  สูงกว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.24

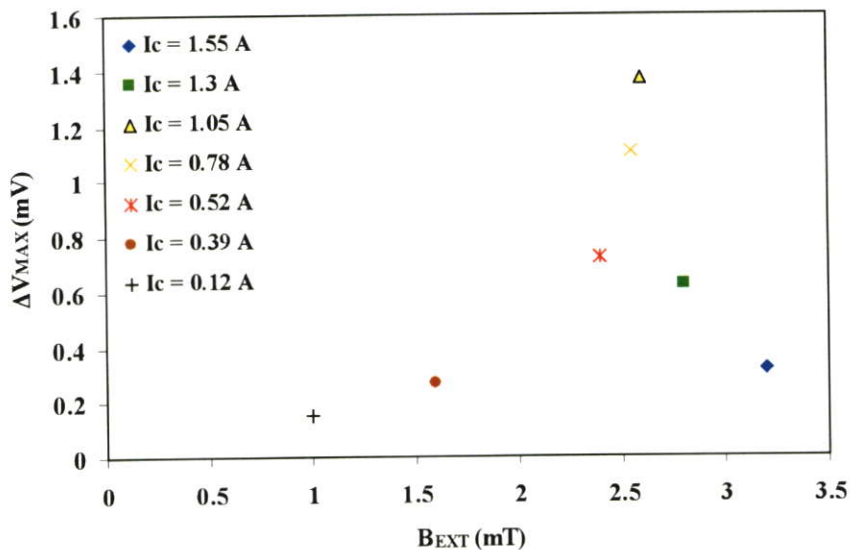


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{EXT}$  กับ  $\Delta V$  ของชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ



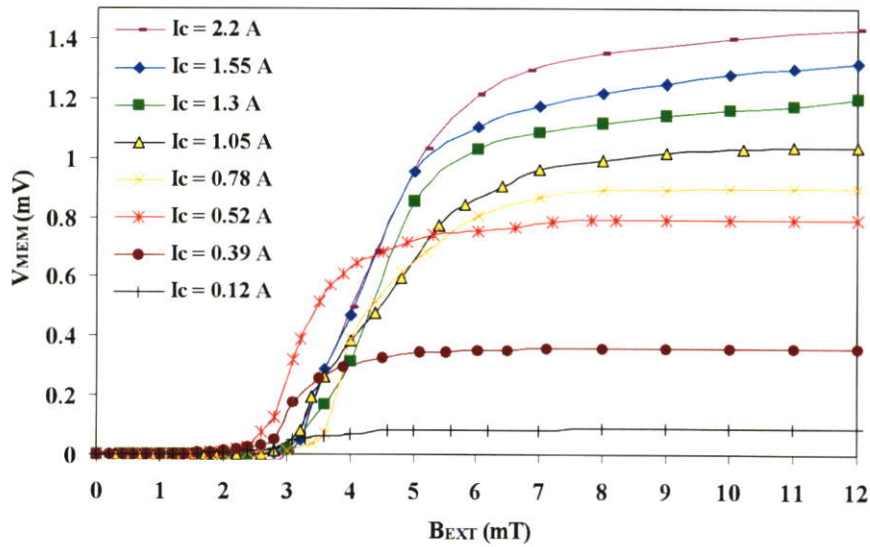
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_c$  กับ  $\Delta V_{MAX}$

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V_{MAX}$  กับ  $B_{EXT}$  ในรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  สูงจะต้องให้สนามแม่เหล็กค่ามากกว่าชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่ำ  $\Delta V_{MAX}$  จึงจะเกิดขึ้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $B_{EXT}$  กับ  $\Delta V_{MAX}$  ของชั้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ

กราฟผลการทดลองในรูปที่ 4.26 แสดงผลการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ ซึ่งพบว่า ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตที่สูงจะจำค่าสนามแม่เหล็กได้มากกว่าชั้นสารที่มีกระแสวิกฤตต่ำ โดยดูได้จากค่าของ  $V_{MEM}$  ขณะอิมิตัว และยังพบอีกว่า ในช่วงของการเริ่มจำแม่เหล็กนั้น ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตสูง จะต้องให้ค่าสนามแม่เหล็กมากกว่าชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่ำ จึงเกิดการจำแม่เหล็กขึ้น ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MEM}$  กับ  $B_{EXT}$  ของชิ้นสารที่กระแสวิกฤตค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.3 สรุปค่า  $B_{EXT}$  ที่ทำให้ชิ้นสารเริ่มเกิดการจำแม่เหล็ก และค่า  $V_{MEM}$  ขณะอิ่มตัว ของชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตต่างๆ

ชิ้นสารที่ค่ากระแสวิกฤตต่างๆ (A)	ค่า $B_{EXT}$ ที่ทำให้ชิ้นสารเริ่มการ จำแม่เหล็ก (mT)	ค่าของ $V_{MEM}$ ขณะอิ่มตัว (mV)
0.12	0.7	0.086
0.39	0.8	0.36
0.52	1	0.79
0.78	1.3	0.89
1.05	1.5	1.078
1.3	1.6	1.24
1.55	1.6	1.35
2.2	2	1.53

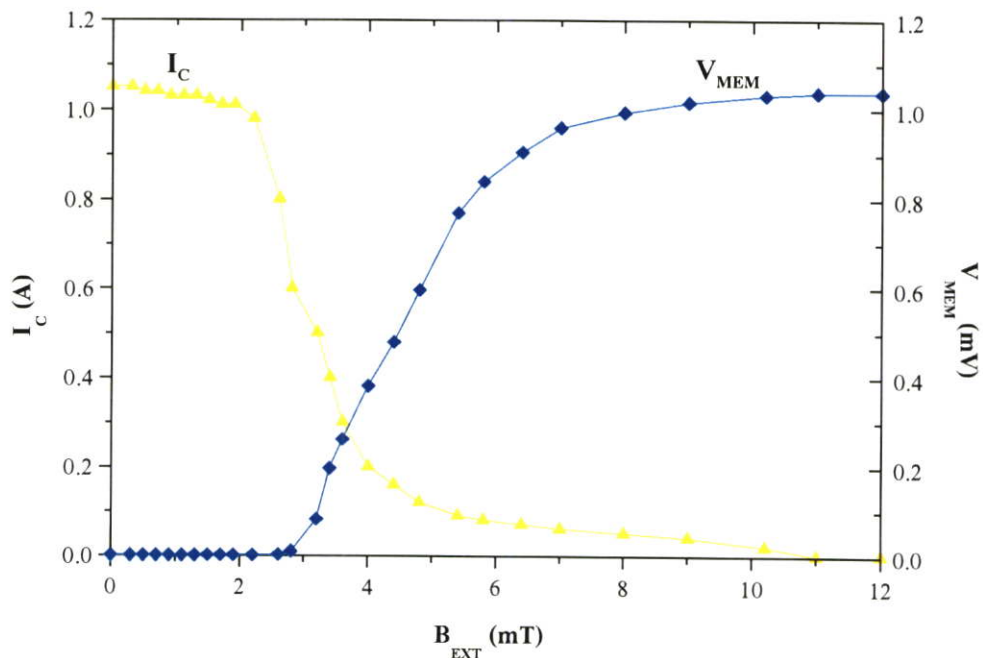
จากตารางที่ 4.4 แสดงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) และค่า  $V_{MEM}$  ที่ทำให้เกิดค่า  $\Delta V_{MAX}$  ขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า  $\Delta V_{MAX}$  จะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นสารอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็กค่าต่างๆเท่านั้น โดยที่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.05 A จะมีค่า  $\Delta V_{MAX}$  สูงสุด เท่ากับ 1.37 mV

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าของ  $B_{EXT}$  และ  $V_{MEM}$  ที่ทำให้เกิดค่า  $\Delta V_{MAX}$

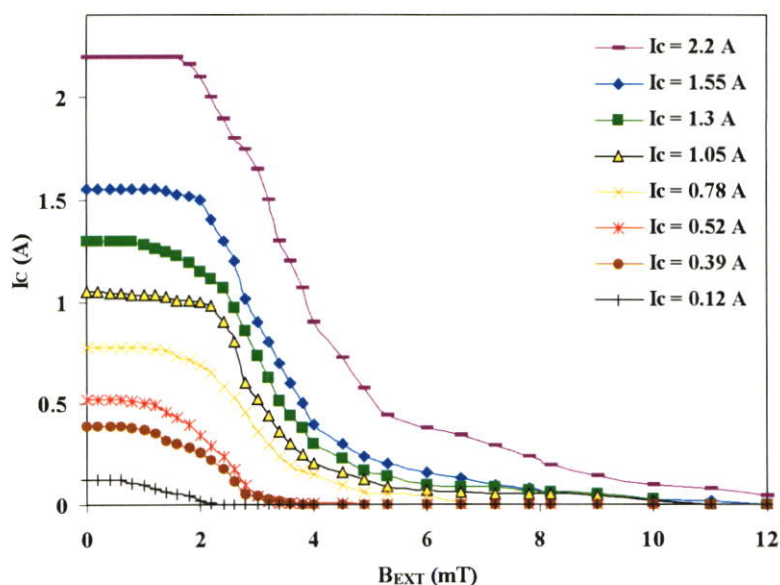
ชั้นสารที่ค่ากระแส วิกฤตต่างๆ (A)	ค่าของ $B_{EXT}$ (mT)	ค่าของ $V_{MEM}$ ที่ทำให้ เกิด $\Delta V_{MAX}$ (mV)	ค่าของ $\Delta V_{MAX}$ (mV)
0.12	1	0.0004	0.145
0.39	1.6	0.0035	0.27
0.52	2.4	0.0282	0.71
0.78	2.6	0.0072	1.09
1.05	2.6	0.0023	1.37
1.3	2.8	0.001	0.61
1.55	3.2	0.0513	0.31

#### 4.2.8 ผลการจำแม่เหล็กที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต

สภาวะการจำแม่เหล็กนอกจากจะมีผลต่อค่า  $\Delta V$  แล้ว ยังมีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของชั้นสารอีกด้วย จากรูปที่ 4.27 เป็นตัวอย่างชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A ที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก ซึ่งพบว่า เมื่อชั้นสารมีการจำแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น โดยดูได้จากค่า  $V_{MEM}$  ที่มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า  $I_C$  ลดลง จนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $V_{MEM}$  เข้าสู่สภาวะอิ่มตัว (ผลการทดลองที่ได้วัดภายหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว)



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $I_C$  และ  $V_{MEM}$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของค่า  $I_c$  กับ  $B_{EXT}$  ของชิ้นสารที่มีค่า  $I_c$  ต่างๆ (โดยวัดหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว)

จากรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตอื่นๆ ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกราฟในรูปที่ 4.27 กล่าวคือ เมื่อให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ กระแสวิกฤต ( $I_c$ ) มีค่าเกือบคงที่หรือลดลงเล็กน้อยเนื่องจากชิ้นสารยังไม่มีกรจําแม่เหล็กเกิดขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้นจนกระทั่งชิ้นสารเกิดการจําแม่เหล็ก ค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ทุกชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ

### 4.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ในสถานะการจําแม่เหล็ก

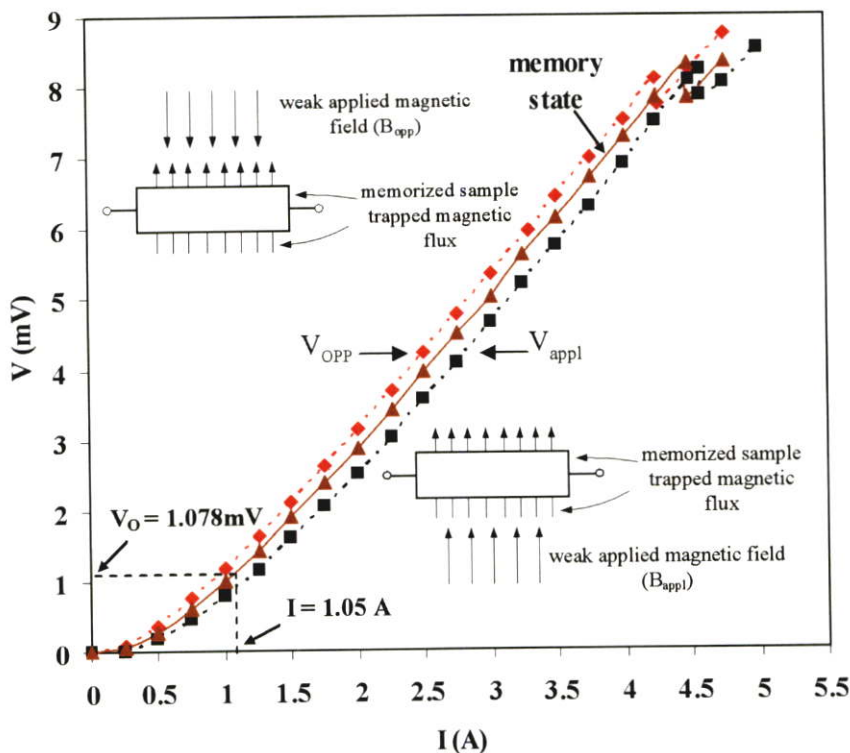
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อยู่ในสถานะการจําแม่เหล็กโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารที่อยู่ในสถานะการจําแม่เหล็กในขณะที่ยังคงให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสาร
2. ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสาร ภายหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว

#### 4.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารที่อยู่ในสถานะการจําแม่เหล็กในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่อยู่ในสถานะการจําแม่เหล็กในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก

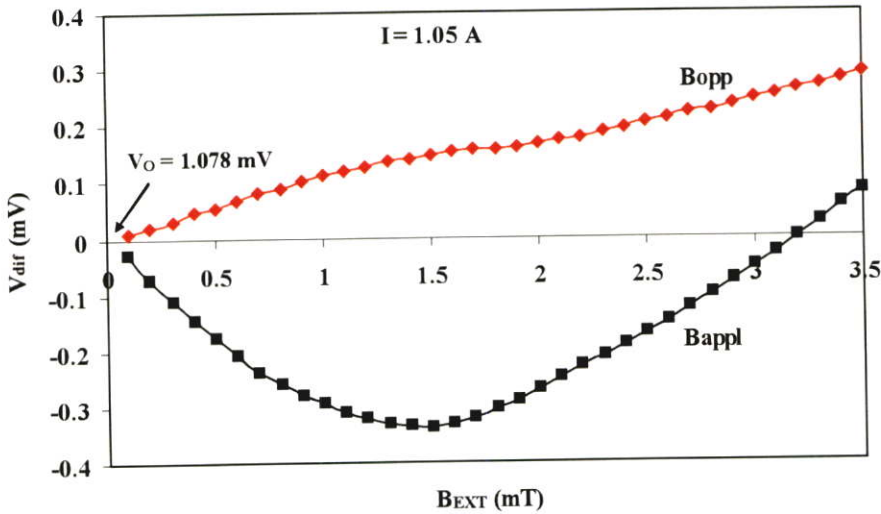
สำหรับชิ้นสารที่ใช้ในการทดลองเป็นชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A ที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก อิมิตัว ที่  $B_{EXT}$  เท่ากับ 12 mT โดยมี  $V_{MEM}$  เท่ากับ 1.078 mV



รูปที่ 4.29 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆที่มีต่อชิ้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.29 กราฟเส้นทึบเป็นกราฟที่ยังไม่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆแก่ชิ้นสารในทิศตรงข้ามกับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กที่จำอยู่ในชิ้นสาร ( $B_{OPP}$ ) ทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆในทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่จำอยู่ในชิ้นสาร ( $B_{appl}$ ) จะทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารมีค่าลดลง

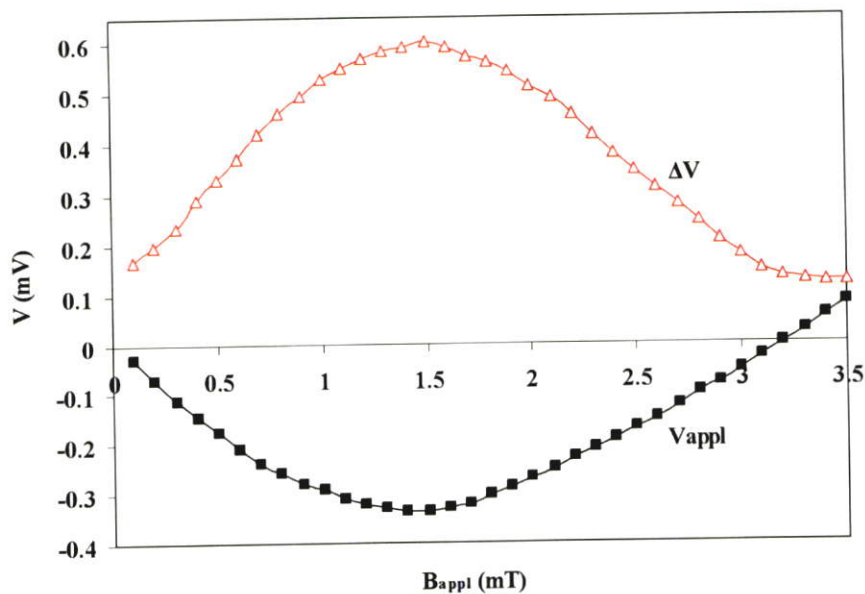
สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเปลี่ยนค่าของสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้กับชิ้นสาร ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ โดยที่  $V_{OPP}$  และ  $V_{appl}$  เป็นแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{OPP}$  และ  $B_{appl}$  ตามลำดับ สำหรับ  $V_{OPP}$  และ  $V_{appl}$  เป็นการวัดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับแรงดันเริ่มต้น  $V_0 = 1.078$  mV ซึ่งพบว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กในช่วงที่น้อยกว่า 3.2 mT ผลของ  $B_{OPP}$  และ  $B_{appl}$  จะให้ผลที่ตรงข้ามกัน ซึ่งดูได้จากค่าของ  $V_{OPP}$  และ  $V_{appl}$



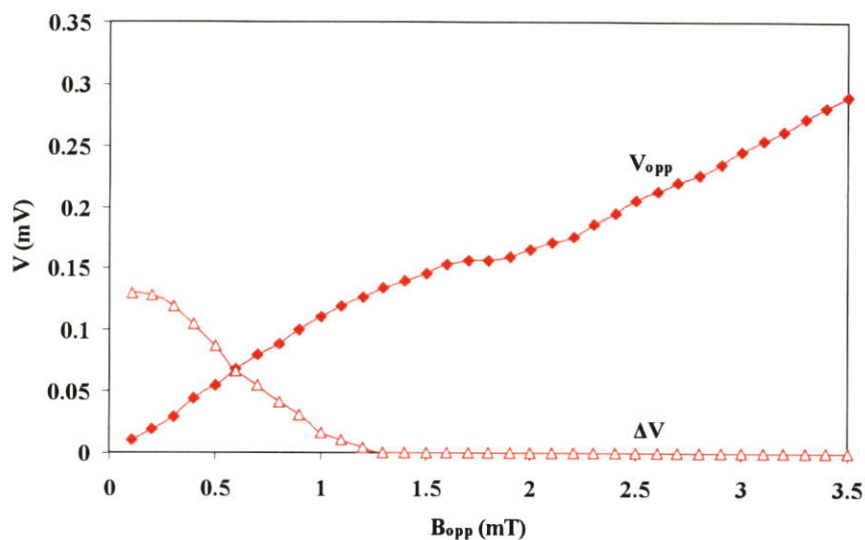
รูปที่ 4.30 แรงดันตกคร่อมชั้นสารที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ  $B_{OPP}$  และ  $B_{appl}$

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V$  กับ  $V_{appl}$  ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กในช่วง 0-1.5 mT ค่า  $V_{appl}$  มีค่าลดลง แต่ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเกินกว่าช่วงนี้  $V_{appl}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้  $\Delta V$  มีค่าลดลง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta V$  กับ  $V_{OPP}$  ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.32 ซึ่งพบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น จะทำให้  $V_{OPP}$  มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่า  $\Delta V$  ลดลง



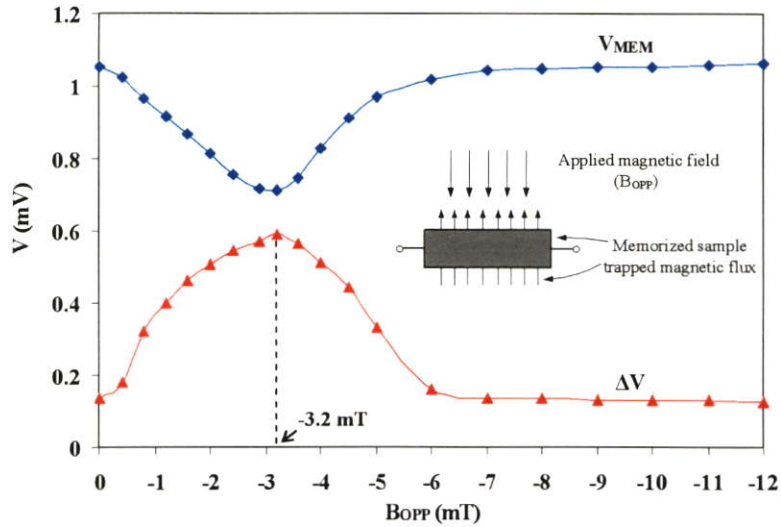
รูปที่ 4.31 ผลของ  $B_{appl}$  ที่มีต่อค่า  $\Delta V$  ของชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก



รูปที่ 4.32 ผลของ  $B_{OPP}$  ที่มีต่อค่า  $\Delta V$  ของชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก

4.3.2 สภาวะหลังจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก หัวข้อนี้จะเป็นการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็กภายหลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว สำหรับชั้นสารที่ใช้ในการทดลองเป็นชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A ซึ่งอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็กที่อิ่มตัว โดยมีค่า  $V_{MEM}$  เท่ากับ 1.078 mV ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.33 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{MEM}$  กับ  $\Delta V$  ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ถูกวัดภายหลังจากนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ให้ จะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กที่จำอยู่ในชั้นสาร ( $B_{OPP}$ )

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า  $V_{MEM}$  มีค่าลดลงเมื่อให้  $B_{OPP}$  ในช่วง 0-3.2 mT และ  $V_{MEM}$  จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อให้  $B_{OPP}$  เกินกว่า 3.2 mT เมื่อพิจารณาถึงค่า  $\Delta V$  พบว่าในขณะที่  $V_{MEM}$  มีค่าลดลง ค่า  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้น และเมื่อ  $V_{MEM}$  มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้  $\Delta V$  มีค่าลดลง โดยมีค่า  $\Delta V$  สูงสุดเท่ากับ 0.589 mV



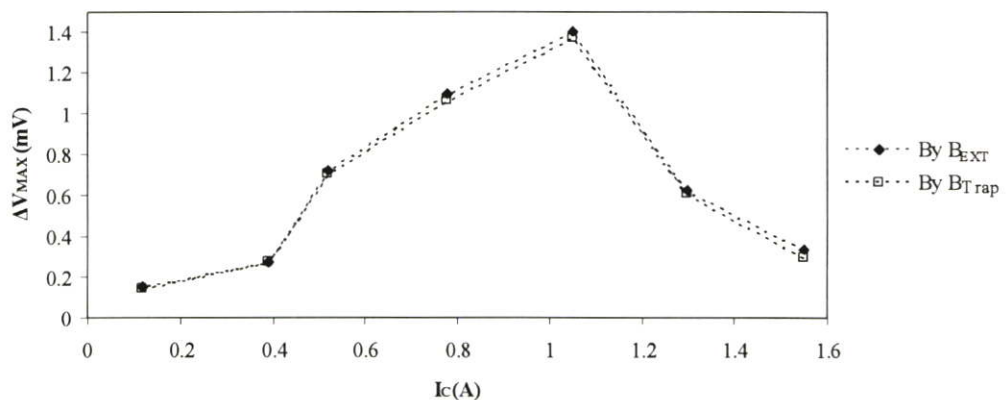
รูปที่ 4.33 ผลของ  $B_{OPP}$  ที่มีต่อค่าของ  $V_{MEM}$  และ  $\Delta V$  โดยวัดหลังจากนำแม่เหล็กออกไปแล้ว

#### 4.4 สรุป

ผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 4.1-4.3 แสดงให้เห็นถึงวิธีการควบคุมขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) และค่ากระแสวิกฤต ( $I_C$ ) โดยใช้สนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. ควบคุมโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) แก่ชิ้นสาร
2. ควบคุมโดยการให้ชิ้นสารอยู่ในสถานะของการจําแม่เหล็ก ( $B_{Trap}$ )

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 วิธี สามารถควบคุมค่าของกระแสวิกฤต และ  $\Delta V$  ได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาถึงค่า  $\Delta V_{MAX}$  ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 4.34

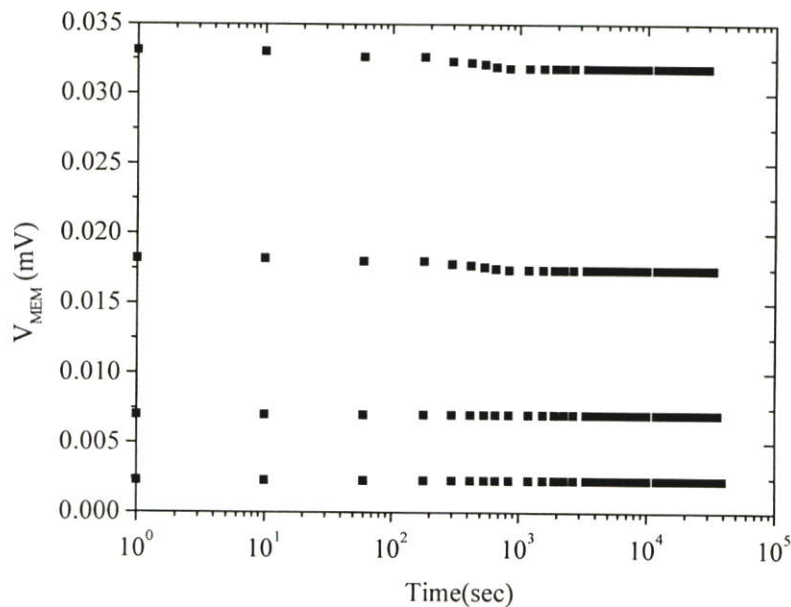


รูปที่ 4.34 แสดงค่าของ  $\Delta V_{MAX}$  ที่เกิดจาก  $B_{EXT}$  และ  $B_{Trap}$  ของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  ต่างๆ

จุดเด่นของการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอก ก็คือสามารถควบคุมค่า  $\Delta V$  และค่าของ  $I_C$  ได้อย่างละเอียดยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมโดยการให้ชั้นสารอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก จะทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานที่จะต้องป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการควบคุมค่าต่างๆ

ถึงแม้ว่าการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเป็นแบบ Nonvolatile แต่จากกราฟในรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่า ถ้าชั้นสารมีการจำแม่เหล็กในช่วงต่ำๆ ( $V_{MEM} < 0.01$  mV) ค่า  $V_{MEM}$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้า  $V_{MEM}$  มีค่าเกินกว่า 0.01 mV ค่าของ  $V_{MEM}$  จะลดลงเล็กน้อย [23] ในช่วงเวลา  $0 - 10^3$  วินาที (ประมาณ 0 - 16 นาที) หลังจากเริ่มจำแม่เหล็ก และจะมีค่าคงที่ไปตลอด ดังนั้นจึงต้องให้ค่า  $V_{MEM}$  ของชั้นสารคงที่เสียก่อน จึงจะนำไปใช้ควบคุมค่าต่างๆได้

สำหรับสาเหตุที่ทำให้  $V_{MEM}$  มีค่าลดลงในช่วงแรก ของการจำแม่เหล็กก็เนื่องมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Flux creep [24], [25] เป็นปรากฏการณ์การเลื่อนของเส้นแรงแม่เหล็กที่แทรกอยู่ในชั้นสารจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนมีการหักล้างกัน จนกระทั่งอยู่ในสภาวะสมดุลปรากฏการณ์นี้ก็จะหายไป



รูปที่ 4.35 แสดงการลดลงของ  $V_{MEM}$  ในชั้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก (ชั้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05$  A)

## บทที่ 5

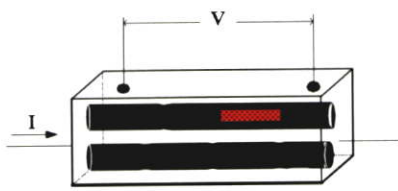
### การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 3 และ 4 โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

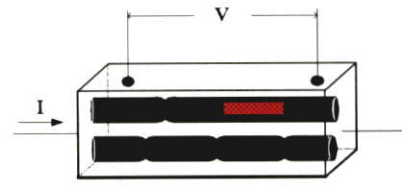
#### 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อ 3.4 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิการเผาและแรงอัดในการขึ้นรูปที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสวิกฤต พบว่า กระแสวิกฤตมีค่าสูงสุดที่  $I_C$  เท่ากับ 2.2 A (ที่อุณหภูมิการเผา  $930^\circ\text{C}$ )

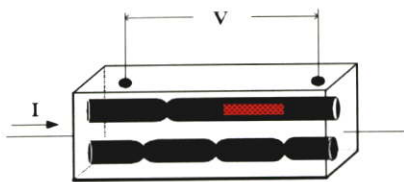
ชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตสูง แสดงว่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความสมบูรณ์มากกว่า ชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตที่ต่ำกว่า ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆจึงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ก)-ง)



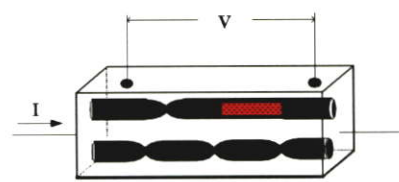
ก) ชิ้นสารที่มี  $I_C = 2.2$  A



ข) ชิ้นสารที่มี  $I_C = 1.55$  A



ค) ชิ้นสารที่มี  $I_C = 1.05$  A



ง) ชิ้นสารที่มี  $I_C = 0.39$  A

รูปที่ 5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤต 2.2, 1.55, 1.05 และ 0.39 A

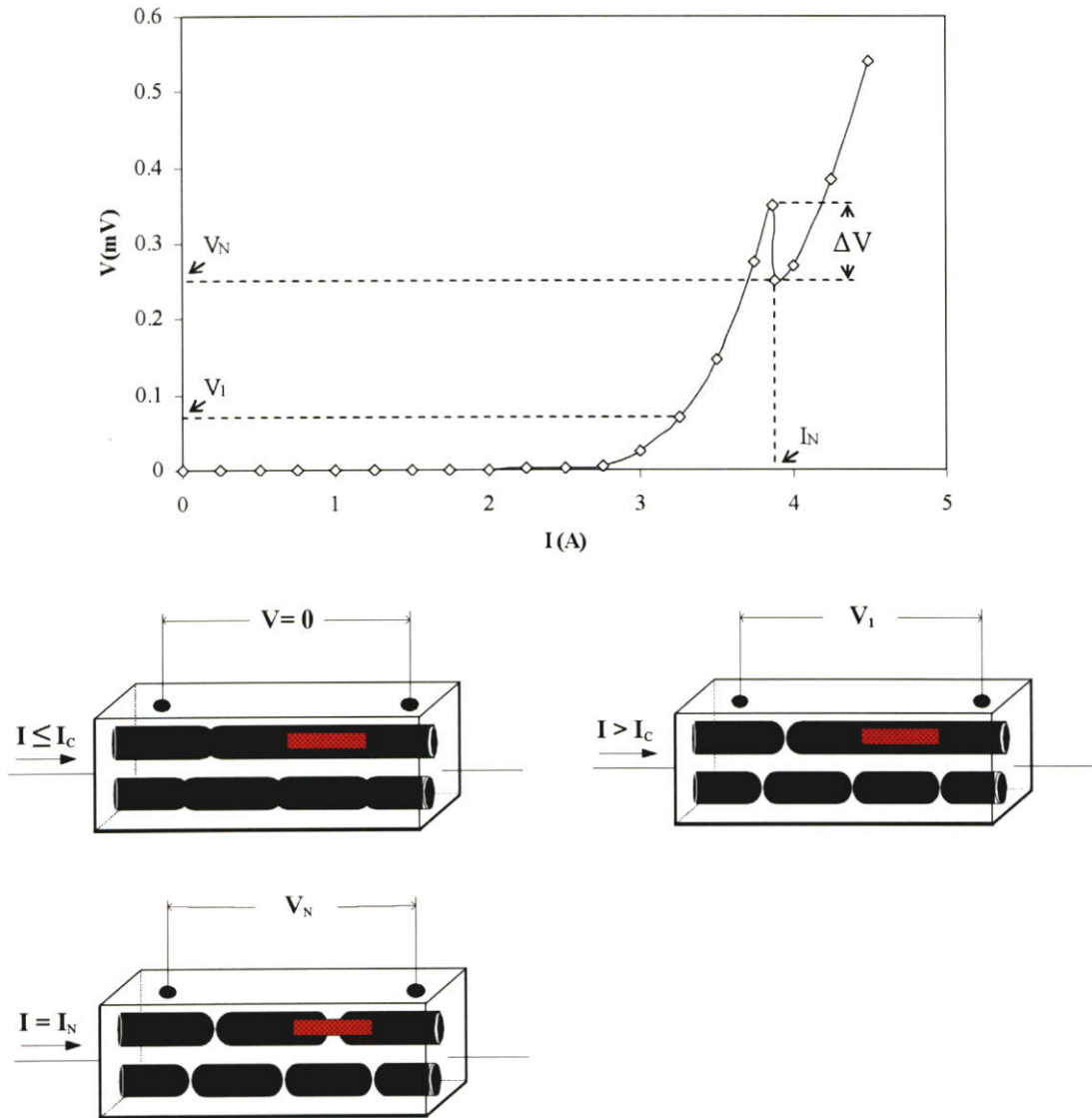
จากรูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวอย่างชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤต 2.2, 1.55, 1.05 และ 0.39 A ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตที่สูง ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดและจุดคอด (Weak point) จะมีการเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงกว่าชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตที่ต่ำกว่า

## 5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มาอธิบายผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อที่ 3.4 โดยพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 3.1 ประกอบด้วย

### 5.2.1 ชั้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 1.55 A

จากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.55 A สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในขณะที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าแก่ชั้นสารน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.55 A ชั้นสารยังคงอยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันตลอดทั้งชั้นสาร จึงไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมชั้นสาร แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเกินกว่า 1.55 A ชั้นสารจะเสียดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จุดคอดจะถูกทำลายกลายเป็นส่วนนำไฟฟ้าธรรมดา (Normal conduction part) หรือกล่าวโดยง่ายก็คือจุดคอดจะขาดจากกันในทุกๆจุด แต่เนื่องจากส่วนขาดของท่อด้านบนมีปริมาณน้อยกว่าส่วนขาดของท่อด้านล่างมาก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดในขณะนี้จึงไหลผ่านท่อด้านบน ในสภาวะนี้เราจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านบนเป็นหลัก และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ส่วนขาดของส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขยายตัวมากขึ้น แรงดันตกคร่อมชั้นสารจึงเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าถึงค่า  $I_N$  จะทำให้ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กขาดออกจากกันบางส่วนเป็นบริเวณกว้างเมื่อเทียบกับจุดคอด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจึงไหลผ่านท่อด้านล่างซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงแรงดันค่าหนึ่ง โดยมีค่า  $\Delta V$  เท่ากับ 0.09 mV.



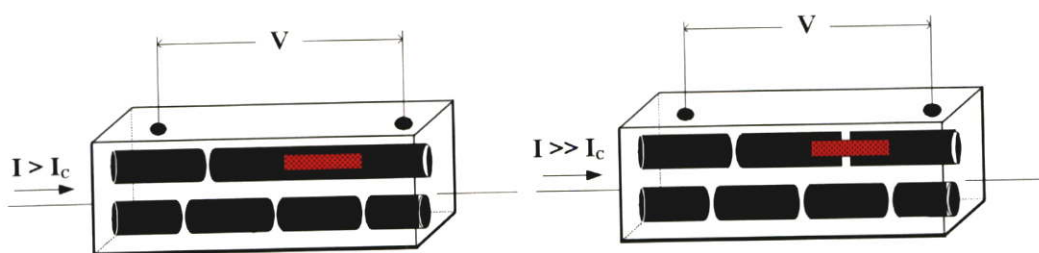
รูปที่ 5.2 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของฉนวน  $I_C = 1.55$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

### 5.2.2 ฉนวนที่มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 1.05 A

กรณีของฉนวนที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนในหัวข้อ 5.2.1 จะมีค่า  $I_C$  ที่ต่ำกว่า จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจึงเห็นได้ว่า ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการเชื่อมต่อกันแข็งแรงน้อยกว่าฉนวนในหัวข้อ 5.2.1 ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงขาดจากกันด้วยค่า  $I_C$  ที่ต่ำกว่า เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) ที่มีค่าต่างกัน ที่ค่า  $\Delta V$  ของฉนวนที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A จะมีค่ามากกว่าฉนวนที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.55 A เนื่องจากในขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้า







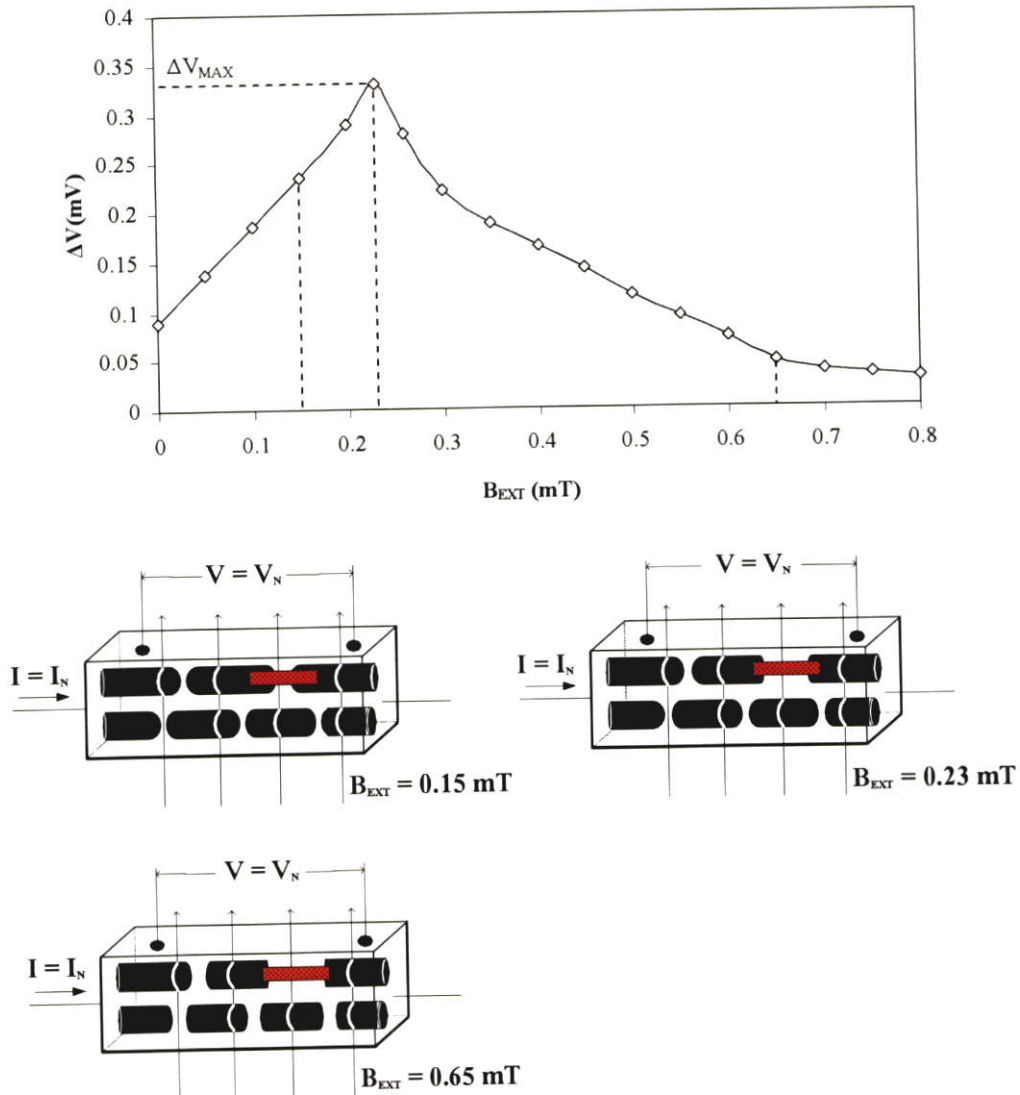
รูปที่ 5.5 อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของฉินสาร  $I_c = 2.2$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

### 5.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของฉินสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 แสดงถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤต ( $I_c$ ) และขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) ของฉินสารที่มีค่า  $I_c$  ต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค และเพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน จึงขอยกตัวอย่างฉินสารที่มีค่า  $I_c$  เท่ากับ 1.55, 1.05 และ 0.39A. มาอธิบายดังนี้

#### 5.3.1 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อฉินสารที่มีค่า $I_c = 1.55$ A

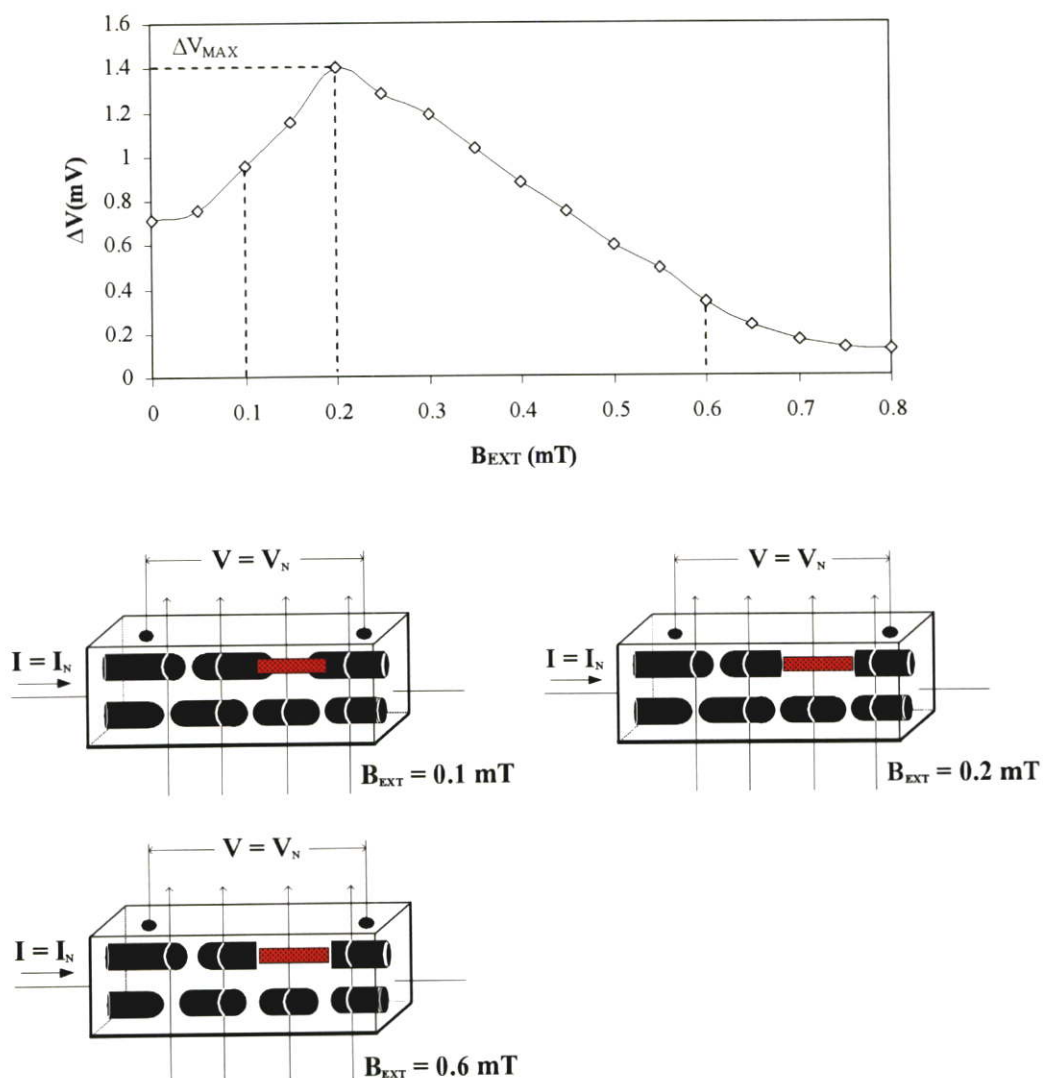
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่า  $I_c$  ลดลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กจะเข้าไปทำลายส่วนนำไฟฟ้ายังยวดทำให้เสียสภาพได้ง่ายขึ้น ดังนั้นค่า  $I_c$  จึงลดลงเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้น และสนามแม่เหล็กยังมีผลโดยตรงกับค่าของ  $\Delta V$  จากรูปที่ 5.6 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ในช่วง 0-0.23 mT. มีผลทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ  $B_{EXT}$  ได้ช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้ายังยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กให้ขาดเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ผลต่างของค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างท่อนำไฟฟ้ายังยวดด้านบนกับท่อด้านล่าง มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้  $B_{EXT}$  เกินกว่า 0.23 mT. ตัวอย่างเช่น  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.65 mT จะทำให้  $\Delta V$  มีค่าลดลง จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ถึงแม้ว่า  $B_{EXT}$  จะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้ายังยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กให้ขาดมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน  $B_{EXT}$  ก็ไปทำลายบางส่วนของส่วนนำไฟฟ้ายังยวดบริเวณท่อด้านล่างให้ขาดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ผลต่างของค่าความต้านทานระหว่างท่อด้านล่างและท่อด้านบนมีค่าน้อยลง มีผลทำให้ค่า  $\Delta V$  ลดลง



รูปที่ 5.6 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มี  $I_c = 1.55$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

### 5.3.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_c = 1.05$ A

พิจารณาจากรูปที่ 5.7 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ในช่วง 0-0.2 mT มีผลทำให้  $\Delta V$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายโดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 5.3.1 แต่จุดที่น่าสนใจอยู่ที่  $B_{EXT} = 0.2$  mT ซึ่งมีผลทำให้  $\Delta V_{MAX}$  มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นสารที่มีค่ากระแสวิกฤตอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ สนามแม่เหล็กภายนอกค่าดังกล่าวได้ช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยาวที่อยู่รอบๆ สารแม่เหล็กให้ขาดออกอย่างสมบูรณ์ มีผลทำให้ผลต่างของค่าความต้านทานระหว่างท่อด้านบนและด้านล่างต่างกันมาก จึงทำให้ค่า  $\Delta V$  มีค่าสูงสุด

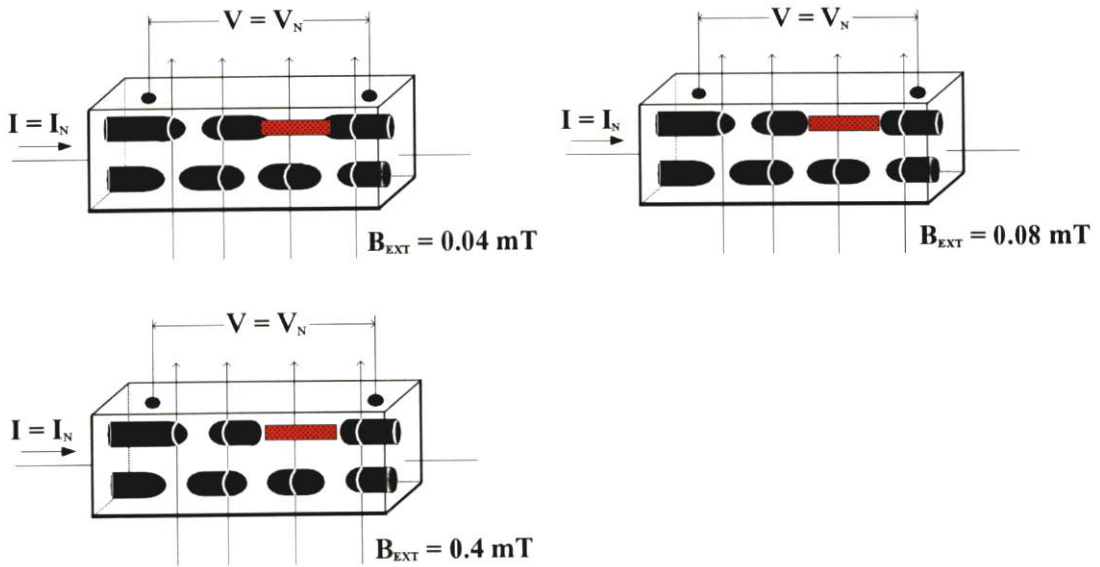
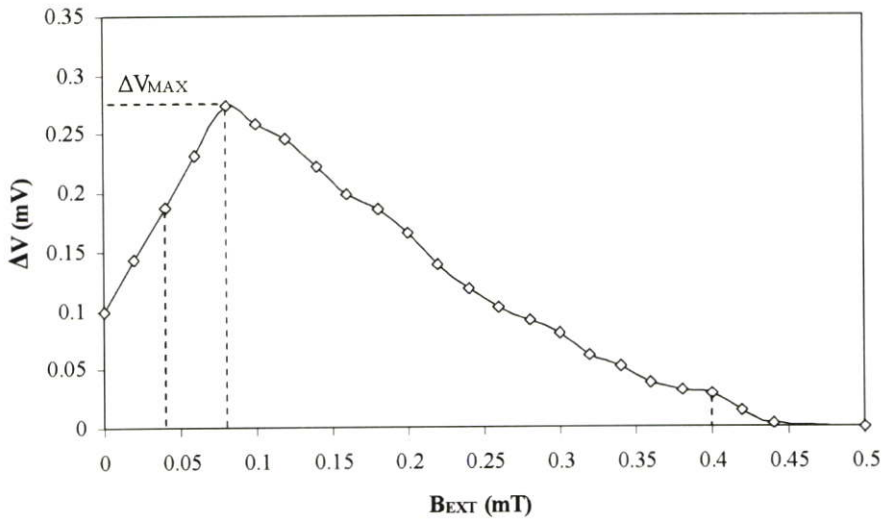


รูปที่ 5.7 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มี  $I_C = 1.05$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

### 5.3.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39$ A

สำหรับชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.39 A จากรูปที่ 5.8 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ในช่วง 0-0.08 mT จะทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ค่า  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.08 mT ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดค่า  $\Delta V_{MAX}$  จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจะเห็นได้ว่า สนามแม่เหล็กภายนอกค่าดังกล่าวช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กให้ขาดออกอย่างสมบูรณ์ แต่ในขณะเดียวกัน ส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต่างก็ถูกทำลายโดยสนามแม่เหล็กให้ขาดออกจากกันมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นค่า  $\Delta V_{MAX}$  ของชิ้นสารนี้จึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A และ

1.55 A

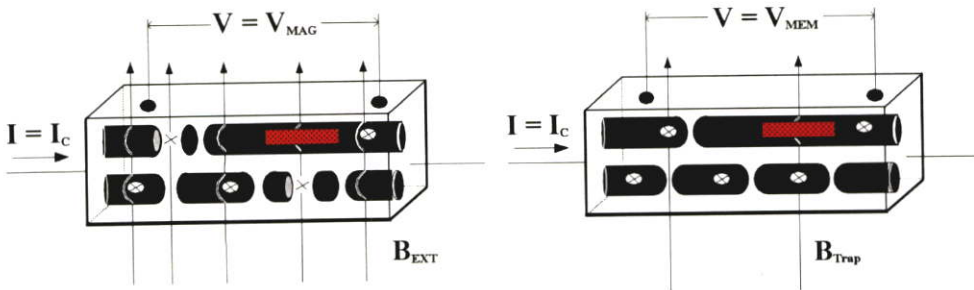


รูปที่ 5.8 อธิบายผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่มี  $I_C = 0.39$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

#### 5.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคสำหรับอธิบายสถานะการจำแม่เหล็กของชิ้นสารที่มีกระแสวิกฤตค่าต่างๆ

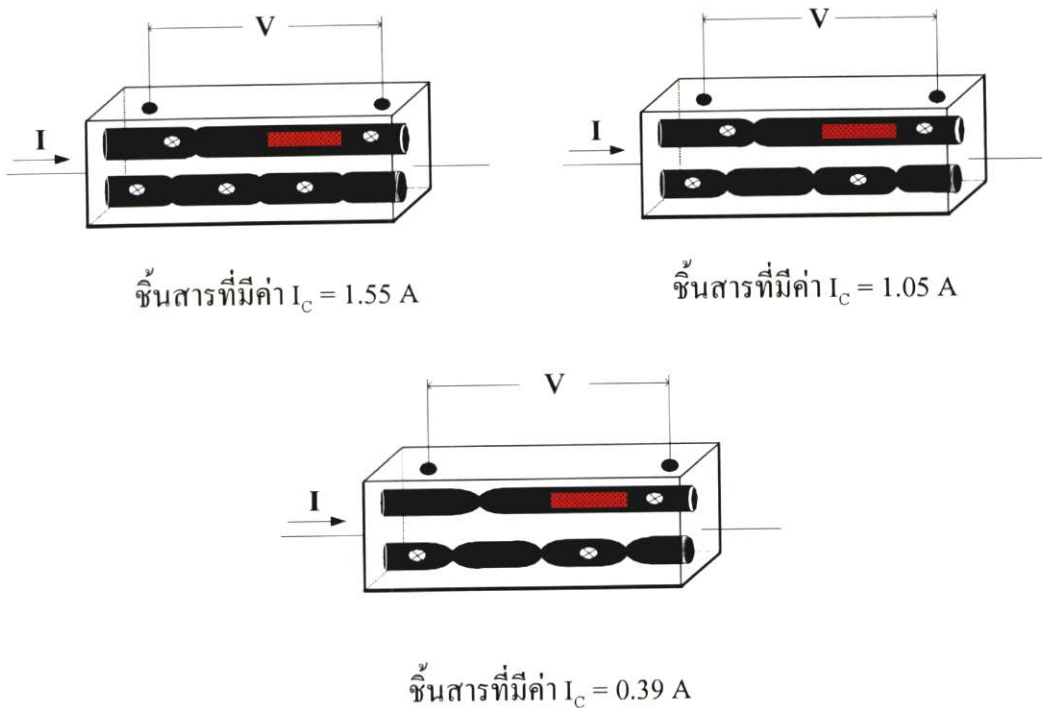
การเกิดสถานะการจำแม่เหล็กในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 5.9 สัญลักษณ์  $\times$  แทนจุดบกพร่อง (Defect region) ที่เกิดขึ้นภายในส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเป็นจุดที่สามารถแทรกเส้นแรงแม่เหล็กได้ ถ้าเราให้สนามแม่เหล็ก ( $B_{EXT}$ ) มีค่าสูงมากพอ สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปถึงจุดบกพร่องได้

ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือกระแสคงสภาพ(Persistent current) ขึ้น หมุนวนอยู่รอบจุดบกพร่อง เป็นเหตุให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งเกิดขึ้น( $B_{\text{Trap}}$ )ถึงแม้จะนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้วก็ตาม ผลของ  $B_{\text{Trap}}$  นี้เองที่ไปทำลายบางส่วนของส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้ขาดออก เป็นเหตุให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร( $V_{\text{MEM}}$ ) ขึ้น



รูปที่ 5.9 อธิบายการเกิดสภาวะการจำแม่เหล็ก โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าในสภาวะที่ชิ้นสารเกิดการจำแม่เหล็กจนอิ่มตัว ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  สูงจะมีค่า  $V_{\text{MEM}}$  ที่มากกว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนจุดบกพร่องของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  สูง มีจำนวนมากกว่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  ต่ำ ซึ่งดูได้จากตัวอย่างแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 5.10



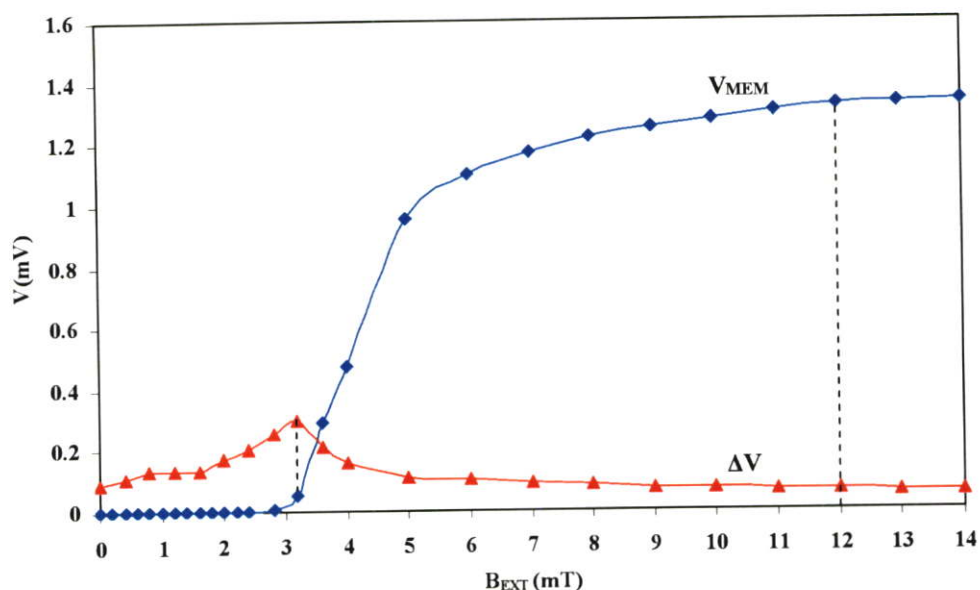
รูปที่ 5.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ใช้อธิบายสภาวะการจำแม่เหล็ก

## 5.5 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอธิบายสถานะการจำแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

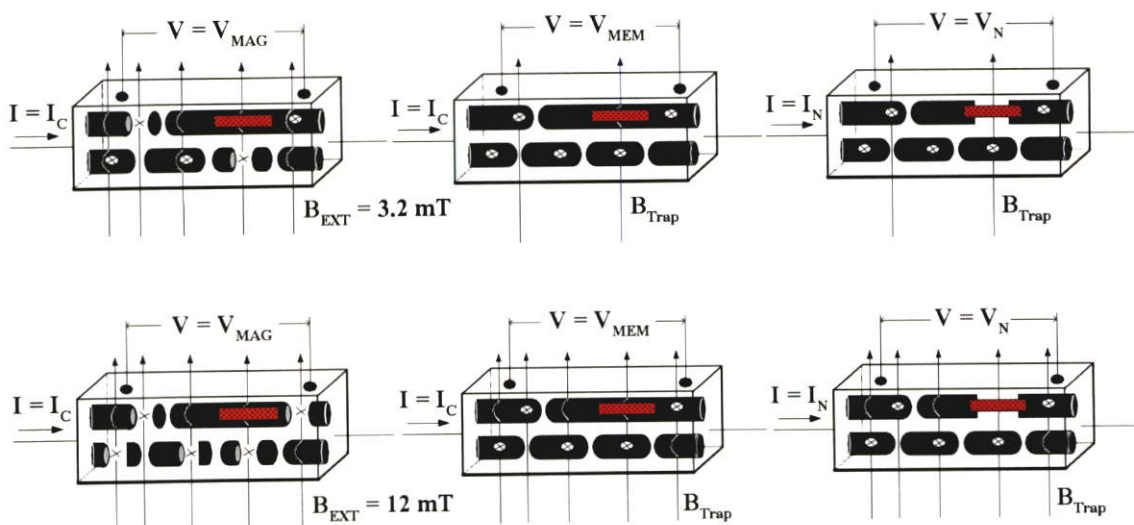
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 แสดงถึงผลของสภาวะการจำแม่เหล็กที่มีต่อค่า  $\Delta V$  ของชั้นสารที่มีค่า  $I_C$  ต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้ดังนี้

### 5.5.1 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชั้นสารที่มีค่า $I_C = 1.55$ A

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 เมื่อพิจารณาในรูปที่ 5.11 ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ค่าต่างๆ ( $B_{EXT} < 1.6$  mT) แก่ชั้นสาร สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านถึงจุดบกพร่องได้ ดังนั้นในขณะนี้สภาวะการจำแม่เหล็กจะยังไม่เกิดขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่ามากพอ ตัวอย่างเช่น  $B_{EXT}$  เท่ากับ 3.2 mT จะสามารถทะลุผ่านถึงจุดบกพร่องได้บ้าง และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกไปแล้ว จะยังคงมี  $B_{Trap}$  เกิดขึ้นอยู่ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชั้นสารจนกระทั่งถึงค่า  $I_N$  ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น ส่วนนำไฟฟ้ายังยวดยวบริเวณที่มีสารแม่เหล็กถูกทำลายและขาดออกจากกัน ในขณะนั้นเอง  $B_{Trap}$  จะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยวดยวบริเวณนี้ให้มีปริมาณส่วนขนาดมากขึ้น จึงทำให้ค่า  $\Delta V$  เพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กภายนอกเกินกว่า 3.2 mT ตัวอย่างเช่น  $B_{EXT}$  เท่ากับ 12 mT สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านจุดบกพร่องได้เกือบทั้งหมด ดังนั้น  $B_{Trap}$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ ถึงแม้ว่า  $B_{Trap}$  จะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยวดยวบริเวณที่มีสารแม่เหล็กซึ่งอยู่บริเวณต่อต้านบนให้ มีปริมาณส่วนขนาดเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน  $B_{Trap}$  ก็จะทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยวดยวต่อต้านด้วยเช่นกัน เป็นเหตุให้ค่า  $\Delta V$  มีค่าลดลง



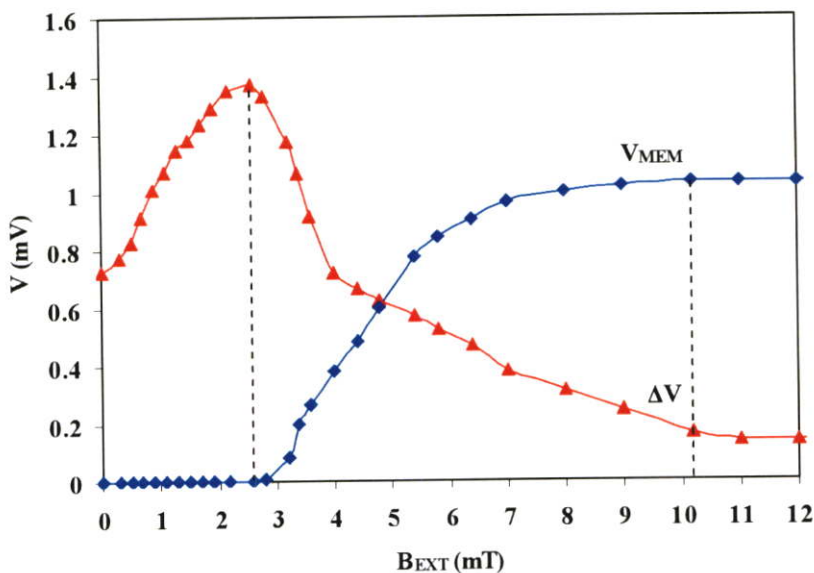
รูปที่ 5.11 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชั้นสารที่มี  $I_C = 1.55$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค



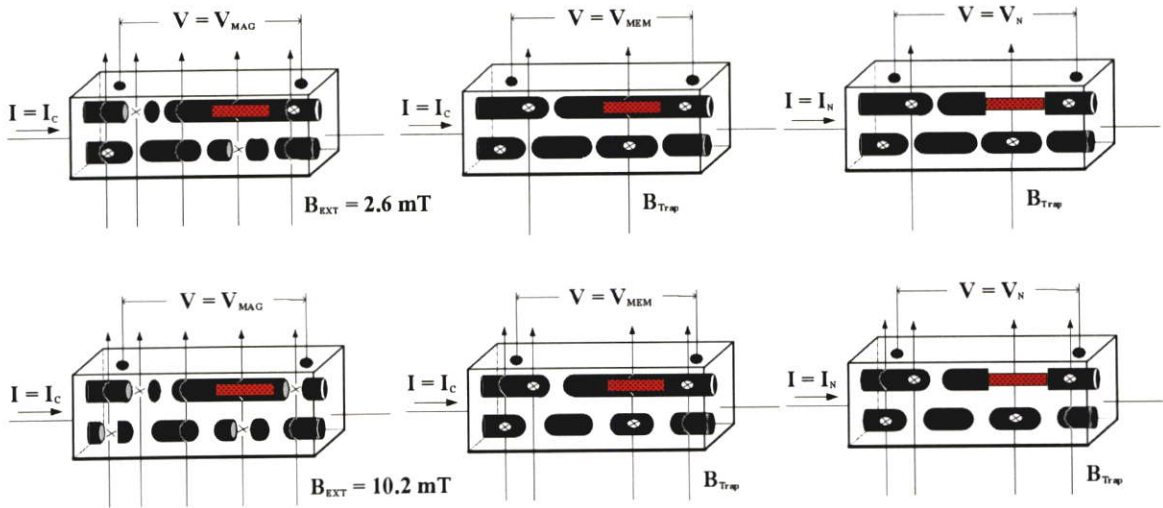
รูปที่ 5.11 (ต่อ)

5.5.2 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05 \text{ A}$

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{EXT}$  เท่ากับ  $2.6 \text{ mT}$  แก่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ  $1.05 \text{ A}$  สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านจุดบกพร่องได้ทำให้เกิด  $B_{Trap}$  ขึ้น ในขณะที่ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น  $B_{Trap}$  จะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้ายังขดบริเวณที่อยู่รอบๆสารแม่เหล็กให้ขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ค่า  $\Delta V_{MAX}$  ในสภาวะนี้มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  อื่นๆ



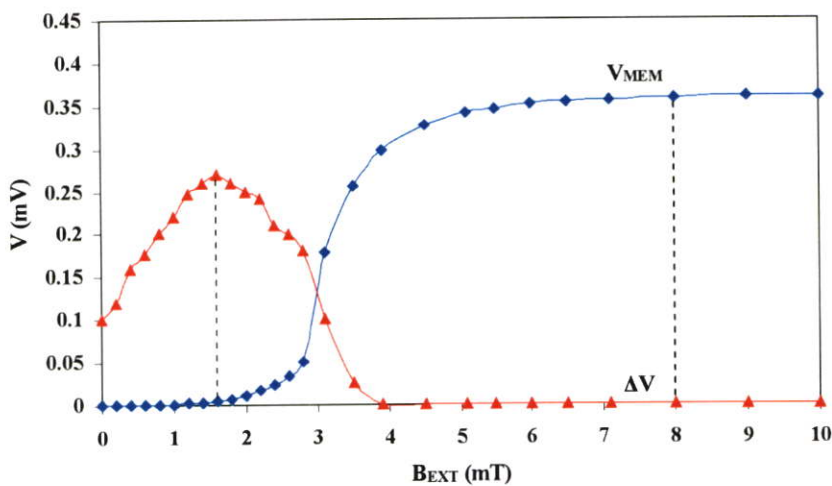
รูปที่ 5.12 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชิ้นสารที่มี  $I_C = 1.05 \text{ A}$  โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค



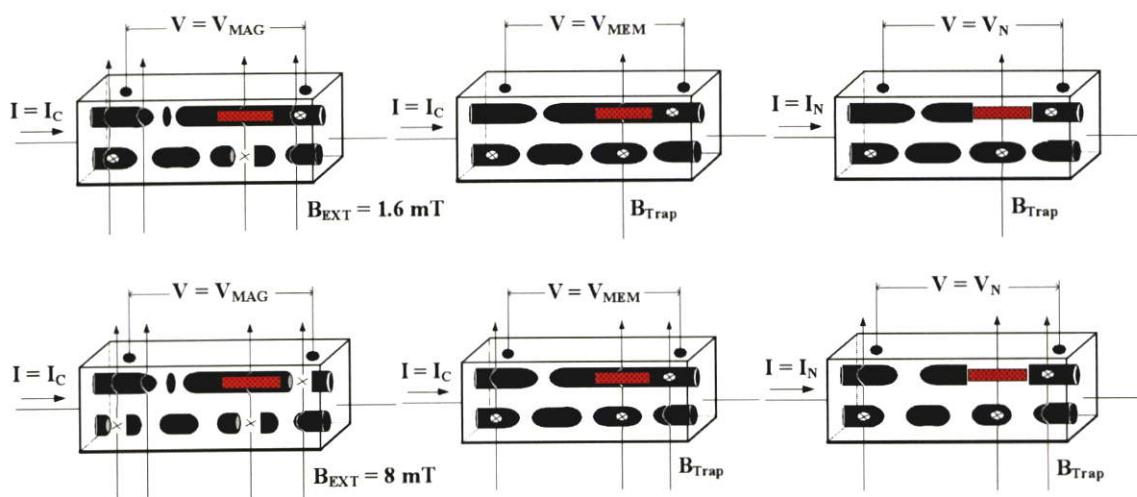
รูปที่ 5.12 (ต่อ)

### 5.5.3 ผลของสภาวะการจำแม่เหล็กต่อชิ้นสารที่มีค่า $I_C = 0.39$ A

จากรูปที่ 5.13 เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 1.6 mT แก่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 0.39 A สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านจุดบกพร่องได้ทำให้เกิด  $B_{Trap}$  ขึ้น ในขณะที่ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น ถึงแม้ว่า  $B_{Trap}$  จะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้ายังขดบริเวณรอบๆสารแม่เหล็กให้ขาดออกจากกันอย่างสมบูรณ์ แต่ในขณะเดียวกัน ส่วนขาดของส่วนนำไฟฟ้ายังขดบริเวณที่ด้านล่างก็ถูกทำลายให้ขาดเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น  $\Delta V_{MAX}$  ของชิ้นสารนี้ จึงมีค่าน้อยกว่าชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A



รูปที่ 5.13 อธิบายผลของสภาวะการจำแม่เหล็กของชิ้นสารที่มี  $I_C = 0.39$  A โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค



รูปที่ 5.13 (ต่อ)

## 5.6 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ในสถานะการจำแม่เหล็ก

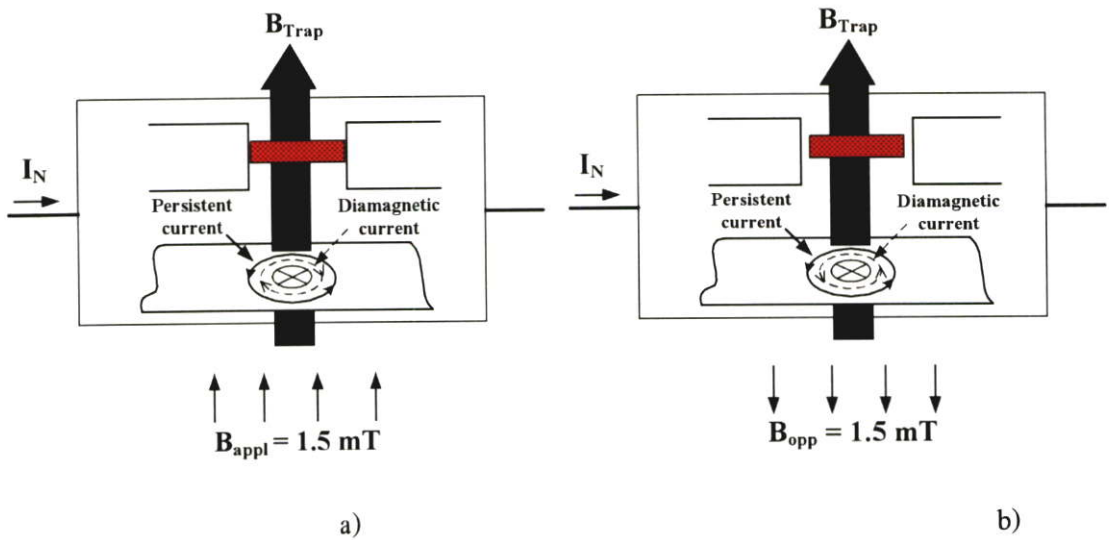
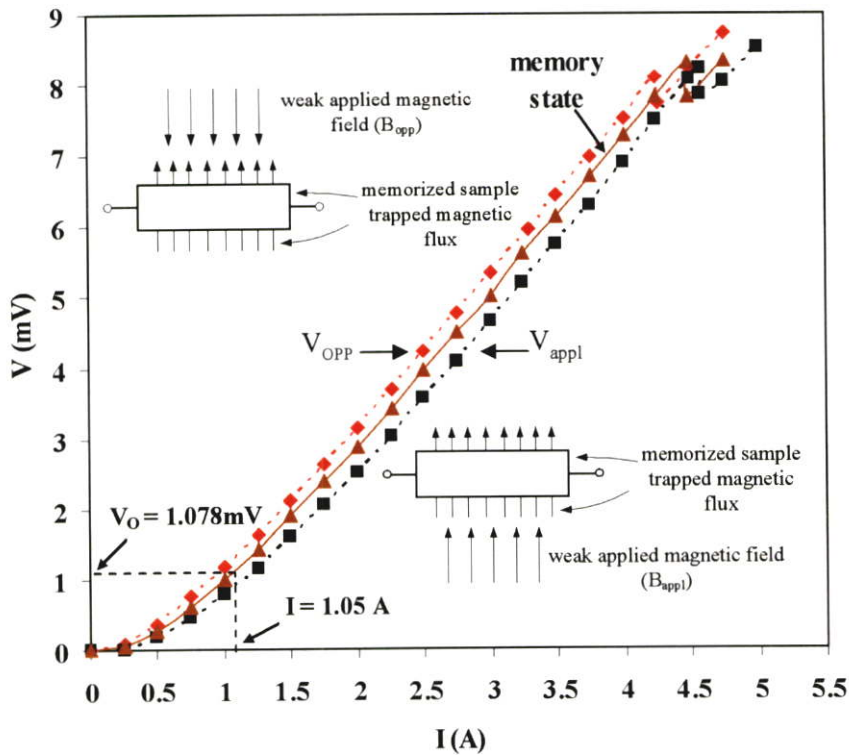
### 5.6.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าในขณะที่ทำให้สนามแม่เหล็กภายนอก

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แสดงให้เห็นถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารที่อยู่ในสถานะการจำแม่เหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคดังแสดงในรูปที่ 5.14

ชิ้นสารเมื่ออยู่ในสถานะการจำแม่เหล็กจะมีกระแสคงสภาพ (Persistent current) ไหลวนอยู่รอบๆ จุดบกพร่องและทำให้เกิด  $B_{\text{Trap}}$  ขึ้น จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ที่มากระทำกับชิ้นสาร ถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีทิศเดียวกับ  $B_{\text{Trap}}$  จะทำให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสาร ( $V_{\text{appl}}$ ) ลดลง และถ้าสนามแม่เหล็กภายนอกมีทิศตรงข้ามกับ  $B_{\text{Trap}}$  แรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าเพิ่มขึ้น ( $V_{\text{opp}}$ )

จากรูปที่ 5.14 a) ในขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับชิ้นสาร กระแสคงสภาพจะไหลในทิศทางเข็มนาฬิกา และเนื่องจากสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติกีดกันสนามแม่เหล็กไดโอด ดังนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{\text{appl}}$ ) ซึ่งมีทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกแทรก ( $B_{\text{Trap}}$ ) แก่ชิ้นสาร จึงเห็นแนวโน้มทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไดโอด (Diamagnetic current) ขึ้นมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กภายนอก เนื่องจากกระแสทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน เส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ทะลุผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงมีค่าลดลง เป็นเหตุให้แรงดันตกคร่อมชิ้นสารลดลง เมื่อพิจารณาในขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเส้นแรงแม่เหล็ก

ทั้งหมดมีค่าลดลงมีผลทำให้ปริมาณส่วนขาดของท่อด้านล่างมีปริมาณน้อยลงผลต่างของค่าแรงดันระหว่างท่อด้านล่างกับท่อด้านบนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น  $\Delta V$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.14 ผลของ  $B_{appl}$  และ  $B_{opp}$  ที่มีต่อชิ้นสารที่อยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็ก

จากรูปที่ 5.14 b) สนามแม่เหล็กที่ป้อนให้แก่ชิ้นสาร ( $B_{opp}$ ) มีทิศทางตรงข้ามกับทิศของ  $B_{Trap}$  ด้วยเหตุผลเดียวกันกับข้างต้น กระแสไฟฟ้าไดอาที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น มีทิศทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ในขณะนี้กระแสทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่ทะลุผ่านชิ้นสารจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้บริเวณส่วนนำไฟฟ้าที่ยังขดที่ถูกทำลายเพิ่มมากขึ้น ทำให้แรงดันตกคร่อม

ชั้นสารมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.32 พบว่าค่า  $\Delta V$  ลดลง เนื่องจากถึงแม้ว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะช่วยทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยึดขดบริเวณที่มีสารแม่เหล็กให้ขาดเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันก็ไปทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยึดขดบริเวณที่ด้านล่างให้ขาดออกเป็นปริมาณมาก ทำให้ผลต่างแรงดันระหว่างท่อล่างและท่อบนมีค่าลดลง

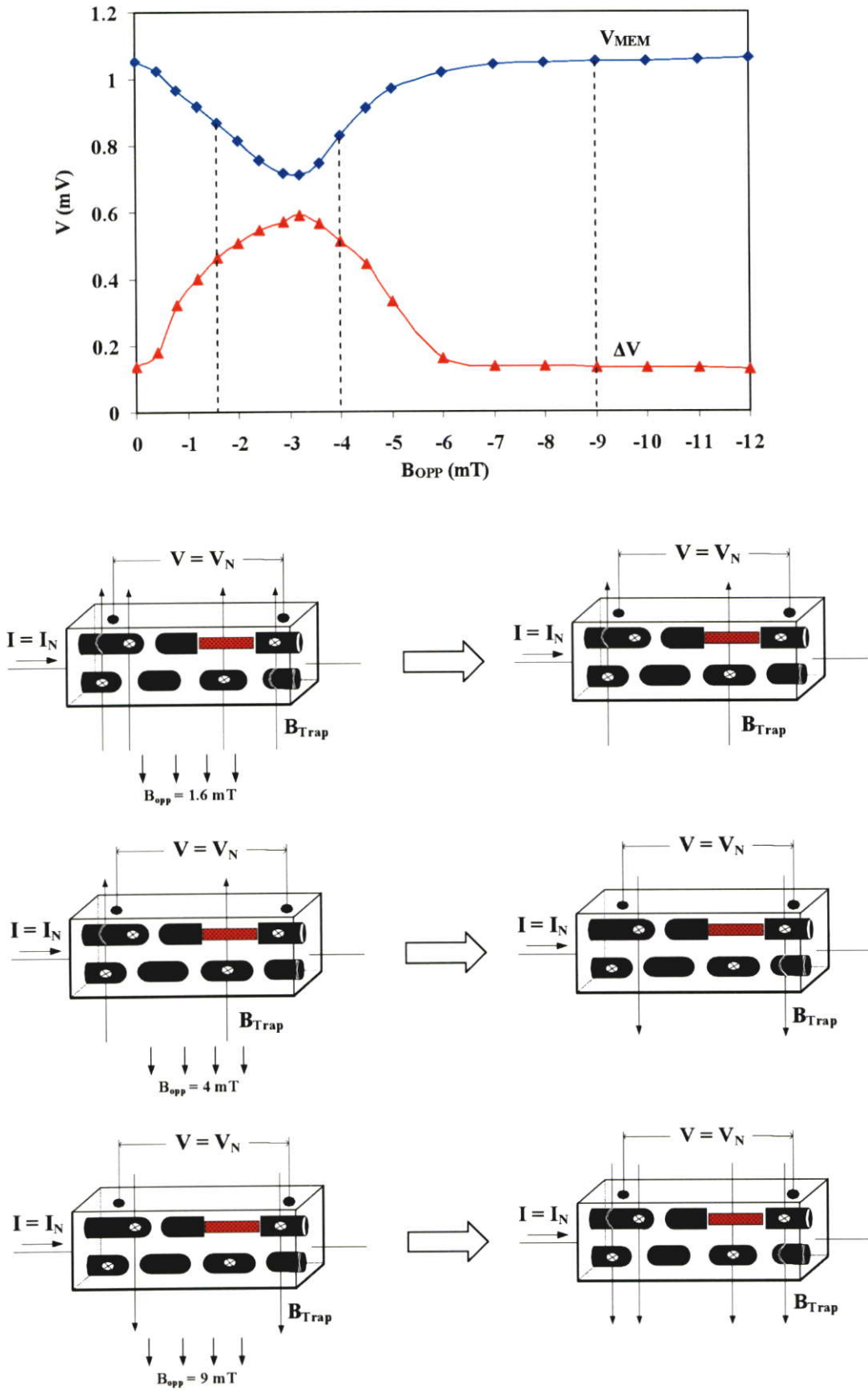
### 5.6.2 สถานะหลังจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชั้นสาร

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 แสดงความสัมพันธ์ของ  $\Delta V$  และ  $V_{MEM}$  ของชั้นสารที่อยู่ในสถานะการจำแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็ก ( $B_{OPP}$ ) ค่าต่างๆ โดยผลการทดลองที่ได้ถูกวัดภายหลังการนำสนามแม่เหล็กออกไปแล้ว จากผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค แสดงดังรูปที่ 5.15

หลังจากที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{OPP}$  เท่ากับ 1.6 mT ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับ  $B_{Trap}$  แก่ชั้นสาร  $B_{OPP}$  จะเข้าไปหักล้างกับ  $B_{Trap}$  บางจุดให้หมดไป ดังนั้นเมื่อนำ  $B_{OPP}$  ออกไปแล้ว  $B_{Trap}$  จะมีค่าลดลง โดยดูได้จากค่าของ  $V_{MEM}$  ซึ่งจะมีค่าลดลง จากกราฟในรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่า ขณะนี้  $\Delta V$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่  $B_{Trap}$  มีค่าลดลงส่งผลให้ส่วนขาดบริเวณที่ด้านล่างถูกทำลายน้อยลง จึงทำให้ปริมาณส่วนขาดลดลง ผลต่างของค่าความต้านทานระหว่างท่อด้านบนและล่างมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าของ  $\Delta V$  นั้นเพิ่มขึ้น

เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น  $B_{OPP}$  เท่ากับ 4 mT สนามแม่เหล็กค่าดังกล่าวจะเข้าไปหักล้างกับ  $B_{Trap}$  ที่อยู่ในชั้นสาร แต่ในขณะเดียวกัน จุดบกพร่อง (Defect) ที่  $B_{Trap}$  นั้นถูกหักล้างหมดไปแต่แรก จะมีการแทรกแม่เหล็กเกิดขึ้นอีกครั้งในทิศเดียวกับ  $B_{OPP}$  จึงทำให้ชั้นสารขณะนี้มีการจำแม่เหล็กในทิศเดียวกับ  $B_{OPP}$  เกิดขึ้น

เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น  $B_{OPP}$  เท่ากับ 9 mT สนามแม่เหล็กค่าดังกล่าวจะสามารถทะลุผ่านจุดบกพร่องได้ทั้งหมด จึงทำให้ขณะนี้ ชั้นสารมีการจำแม่เหล็กในทิศเดียวกับ  $B_{OPP}$  อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 5.15 ผลของ  $B_{OPP}$  ที่มีต่อค่าของ  $V_{MEM}$  และ  $\Delta V$  โดยวัดหลังจากนำแม่เหล็กออกไปแล้ว

## 5.7 สรุป

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายผลการทดลองต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอก รวมถึงสถานะการจำแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ เป็นแบบจำลองโครงสร้างในระดับมหภาค ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างมหภาคเราจะคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญหลักๆ คือ

1. ค่ากระแสวิกฤต ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงในส่วนของ Superconduction path ถ้าชิ้นสารมีค่ากระแสวิกฤตที่สูง ส่วนของ Superconduction path ก็จะเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรง เป็นต้น

2. สถานะการจำแม่เหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของการจำแม่เหล็กจนอิ่มตัว (โดยดูได้จากค่า  $V_{MEM}$  จะเริ่มเข้าสู่สถานะคงที่) จะเป็นตัวกำหนด ปริมาณของ Defect ที่จะมีอยู่ในส่วนของ Superconduction path โดยที่ชิ้นสารที่มีค่า  $V_{MEM}$  ในขณะที่อิ่มตัว มีค่าสูง จำนวน Defect ก็จะมากกว่าชิ้นสารที่มีค่า  $V_{MEM}$  ในขณะที่อิ่มตัว ที่ต่ำกว่า

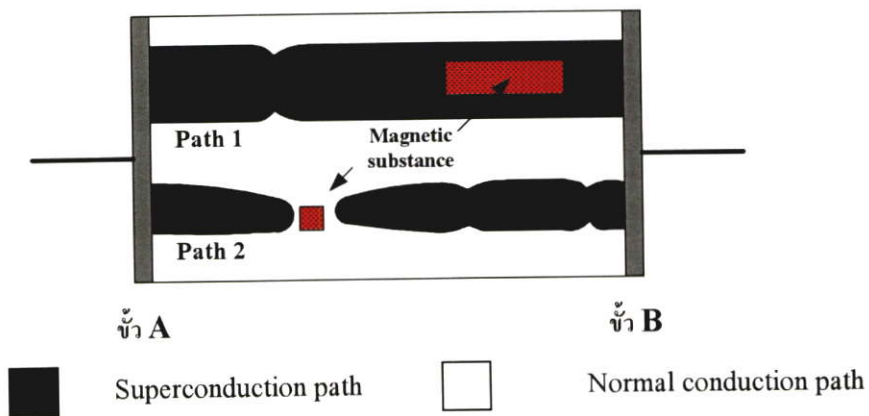
จากผลการทดลองที่ได้ สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคได้อย่างสอดคล้อง

## บทที่ 6

# แนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

### 6.1 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคเบื้องต้น

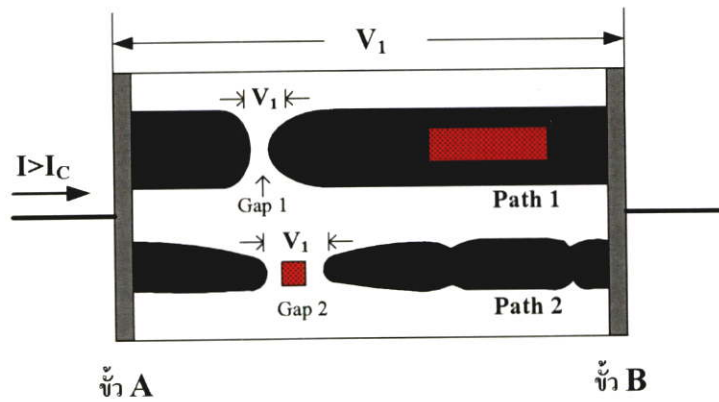
เรายังคงพิจารณาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Current controlled negative resistance (CCNR) แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ในขณะที่ยังไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสาร ถูกแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำยิ่งยวดที่ไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้า

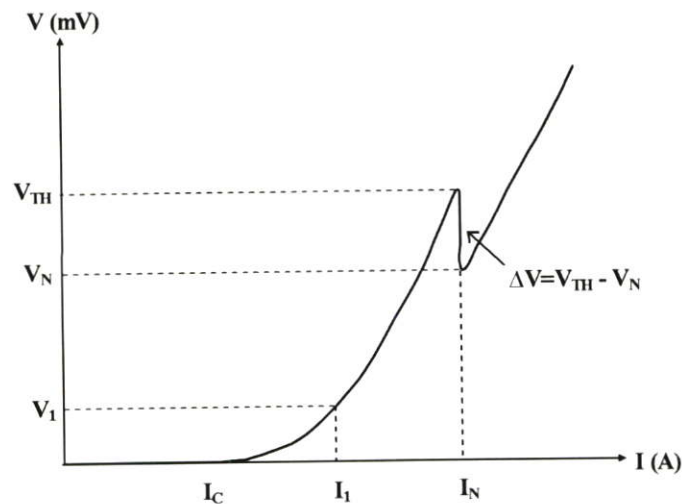
ขั้ว A และขั้ว B เชื่อมต่อกันโดยส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconduction part) เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารมีค่าน้อยกว่า  $I_c$  กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านเฉพาะ Path 1 เท่านั้น แรงดันตกคร่อมระหว่างขั้ว A และ B มีค่าเป็นศูนย์

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารเกินกว่าค่า  $I_c$  แรงดันตกคร่อมชิ้นสารระหว่างขั้ว A และ B เกิดขึ้น เนื่องจาก Part 1 บริเวณจุดคอดถูกทำลายกลายเป็นส่วนนำไฟฟ้าธรรมดา (Normal conduction part) ดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยพิจารณาบริเวณ Normal conduction part ในส่วนของ Path 1 และ Path 2 เป็น Gap1 และ Gap2 ตามลำดับ



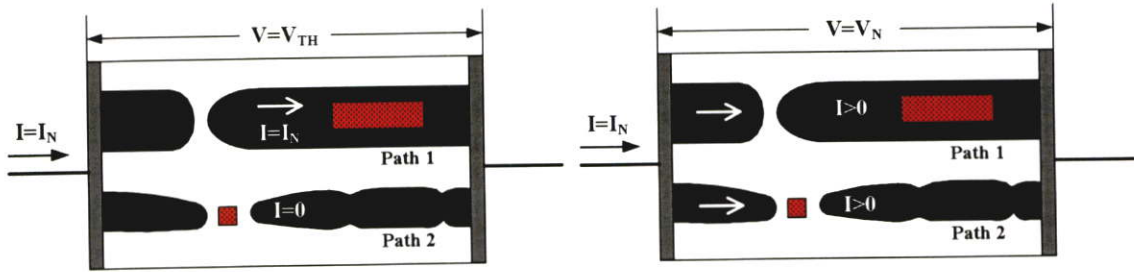
รูปที่ 6.2 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคขณะที่  $I > I_C$

ขณะนี้กระแสไฟฟ้ายังคงไหลผ่าน Path 1 โดยที่ Path 2 ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เนื่องจาก ความกว้างของ Gap2 กว้างกว่า Gap1 อยู่มาก กระแสไฟฟ้าจึงไม่ไหลผ่านในส่วนของ Path 2 และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งถึงค่า  $I_N$  ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้น

ที่  $I = I_N$  แรงดันตกคร่อมที่ Gap1 และ Gap2 มีค่าเท่ากับ  $V_{TH}$  ขณะนี้เองกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่าน Gap2 ดังนั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทั้ง Path 1 และ Path 2 ดังแสดงในรูป 6.4 ก) และ ข)

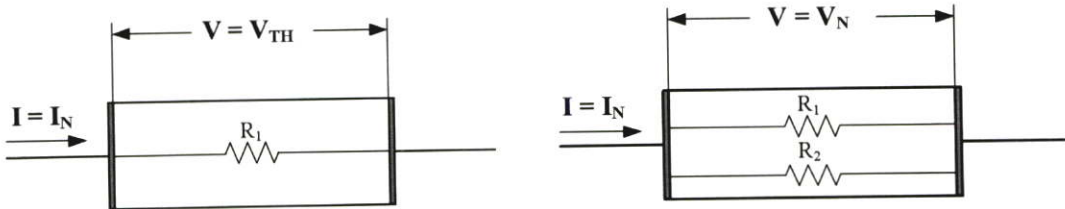


ก) กระแสไหลผ่าน Path 1 เมื่อ  $V = V_{TH}$

ข) กระแสไหลผ่านทั้ง Path 1 และ 2 เมื่อ  $V = V_N$

รูปที่ 6.4 การไหลของกระแสไฟฟ้าในขณะที่  $V = V_{TH}$  และ  $V = V_N$

สำหรับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ Path 1 ในรูปที่ 6.4 ก) และ ข) แทนด้วยสัญลักษณ์  $R_1$  ส่วนค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของ Path 2 หลังจากที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แทนด้วยสัญลักษณ์  $R_2$  วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของรูปที่ 6.4 ก) และ ข) แสดงดังรูปที่ 6.5 ก) และ ข) ตามลำดับ



ก)  $V = V_{TH}, I = I_N$

ข)  $V = V_N, I = I_N$

รูปที่ 6.5 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าในขณะก่อนและหลังการเกิดความต้านทานเชิงลบ

จากรูปที่ 6.5 ก) สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของ  $V_{TH}, I_N$  และ  $R_1$  ดังนี้

$$V_{TH} = I_N R_1$$

$$\therefore R_1 = \frac{V_{TH}}{I_N} \tag{6.1}$$

ในลักษณะเดียวกัน เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ  $R_1, R_2, V_N$  และ  $I_N$  จากรูปที่ 6.5 ข) ได้ดังนี้

$$V_N = (R_1 \parallel R_2) I_N = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{TH} \tag{6.2}$$

จากสมการที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่า  $V_N$  มีค่าน้อยกว่า  $V_{TH}$

สำหรับขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) สามารถหาได้โดย

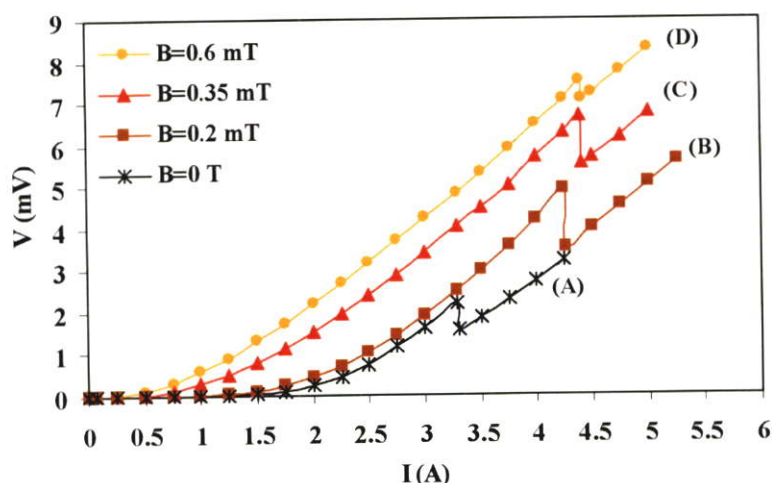
$$\Delta V = V_{TH} - V_N \quad (6.3)$$

$$= I_N R_1 - I_N \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\therefore \Delta V = I_N \frac{R_1^2}{R_1 + R_2} \quad (6.4)$$

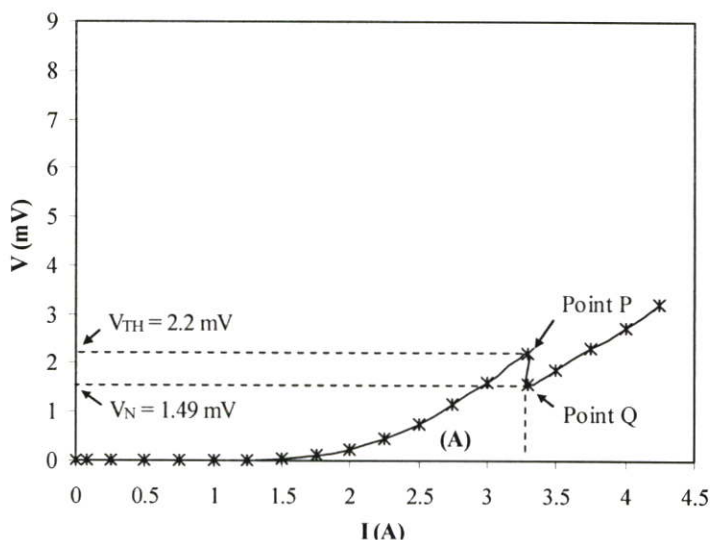
จากสมการที่ 6.4 จะเห็นได้ว่า ค่า  $\Delta V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $R_1$  เพิ่มขึ้น และค่า  $\Delta V$  จะลดลงเมื่อค่า  $R_2$  เพิ่มขึ้น

จากการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT}$ ) ที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A แสดงดังรูปที่ 6.6 สำหรับกราฟ A เป็นผลการวัดในขณะที่ยังไม่มี  $B_{EXT}$  ส่วนกราฟ B, C และ D เป็นผลที่ได้จากการวัดในขณะที่ให้ค่าสนามแม่เหล็ก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.2, 0.35 และ 0.6 mT ตามลำดับ



รูปที่ 6.6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารที่มีค่า  $I_C = 1.05$  A ในขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

กรณีของกราฟ A แสดงดังรูปที่ 6.7 ความต้านทานเชิงลบ (CCNR) เกิดขึ้นที่  $I_N = 3.29$  A,  $V_{TH} = 2.2$  mV และ  $V_N = 1.49$  mV



รูปที่ 6.7 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นของกราฟ A

จากรูปที่ 6.7 ที่จุด P แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้ว A และ B กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นสารเป็น  $V_{TH} = 2.2 \text{ mV}$  และ  $I_N = 3.29 \text{ A}$  ตามลำดับ ที่จุด Q แรงดันและกระแสไฟฟ้าเป็น  $V_N = 1.49 \text{ mV}$  และ  $I_N = 3.29 \text{ A}$  ตามลำดับ

$$R_p = R_1 = \frac{2.2 \text{ mV}}{3.29 \text{ A}} = 0.67 \text{ m}\Omega$$

ในลักษณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่จุด Q ( $V = V_N$ )

$$\begin{aligned} R_Q = R_{12} &= (R_1 \parallel R_2) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_N}{I_N} \\ &= \frac{1.49 \text{ mV}}{3.29 \text{ A}} = 0.453 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (6.5)$$

และจากสมการที่ 6.5 สามารถนำมาหาค่า  $R_2$  ได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{R_{12} R_1}{R_1 - R_{12}} \quad (6.6)$$

เมื่อนำค่า  $R_1 = 0.67 \text{ m}\Omega$  และ  $R_{12} = 0.453 \text{ m}\Omega$  แทนในสมการที่ 6.6 จะได้

$$R_2 = \frac{(0.453 \text{ m}\Omega)(0.67 \text{ m}\Omega)}{(0.67 \text{ m}\Omega) - (0.453 \text{ m}\Omega)} = 1.4 \text{ m}\Omega$$

กรณีของกราฟ B สามารถคำนวณค่าต่างๆได้ในลักษณะเดียวกับกราฟ A โดยกำหนดให้ ค่าความต้านทานของ Path 1 และ Path 2 ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกเป็น  $R_{1B}$  และ  $R_{2B}$  โดยมีค่า  $V_{TH}$ ,  $V_N$  และ  $I_N$  คือ 4.9 mV, 3.5 mV และ 4.25 A ตามลำดับ ค่า  $R_{1B}$  และ  $R_{2B}$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_{1B} = \frac{V_{TH}}{I_N} = \frac{4.9 \text{ mV}}{4.25 \text{ A}} = 1.15 \text{ m}\Omega$$

$$R_{12B} = \frac{V_N}{I_N} = \frac{3.5 \text{ mV}}{4.25 \text{ A}} = 0.824 \text{ m}\Omega$$

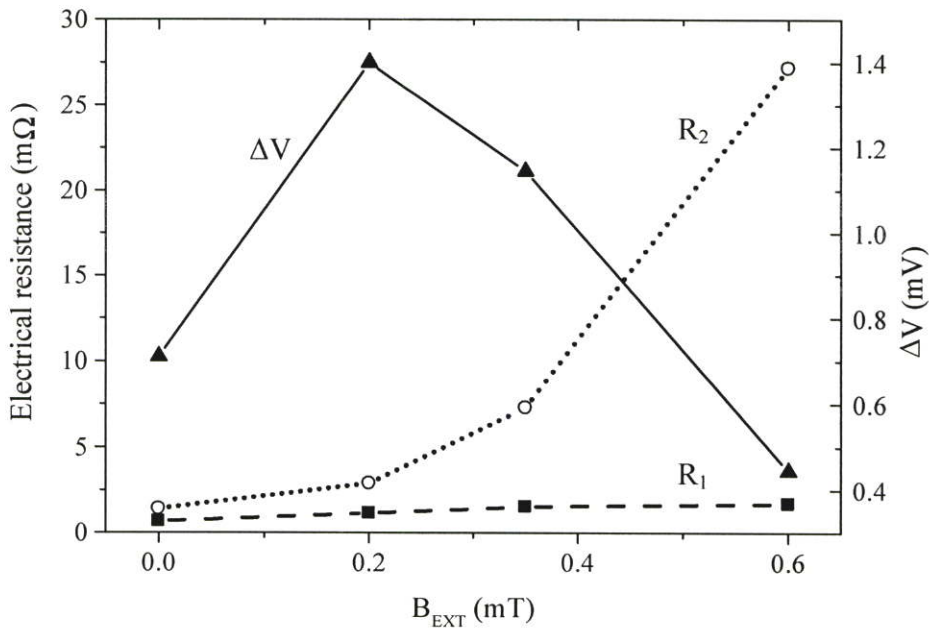
ดังนั้น

$$R_{2B} = \frac{R_{12B} R_{1B}}{R_{1B} - R_{12B}} = 2.905 \text{ m}\Omega$$

ในกรณีของกราฟ C และ D สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับกราฟ B ผลการคำนวณค่าของ  $R_1$ ,  $R_{12}$ ,  $R_2$ ,  $V_{TH}$ ,  $V_N$ ,  $I_N$  และ  $\Delta V$  ที่ได้จากกราฟ A-D แสดงในตารางที่ 6.1

**ตารางที่ 6.1** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

กราฟ	$B_{EXT}$ (mT)	$R_1$ (m $\Omega$ )	$R_{12}$ (m $\Omega$ )	$R_2$ (m $\Omega$ )	$V_{TH}$ (mV)	$V_N$ (mV)	$I_N$ (A)	$\Delta V$ (mV)
A	0	0.67	0.453	1.4	2.2	1.49	3.29	0.71
B	0.2	1.15	0.824	2.905	4.9	3.5	4.25	1.4
C	0.35	1.52	1.256	7.3	6.67	5.525	4.4	1.145
D	0.6	1.7	1.6	27.2	7.49	7.045	4.41	0.445



รูปที่ 6.8 ผลของ  $B_{EXT}$  ที่มีต่อค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $\Delta V$

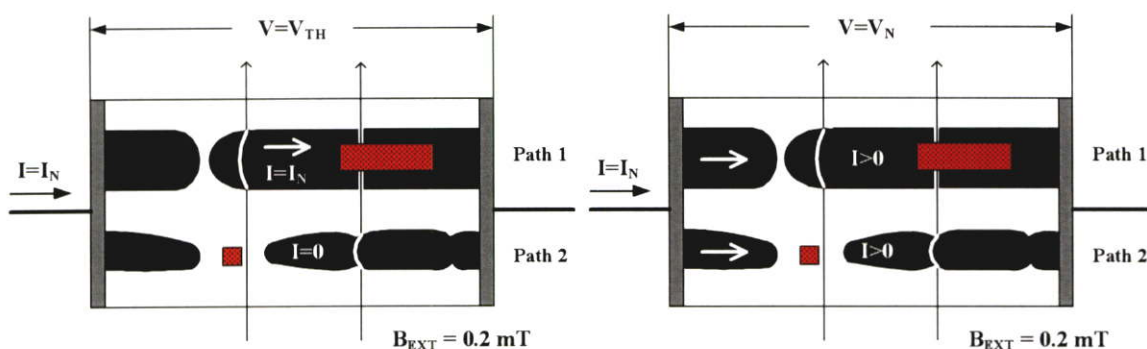
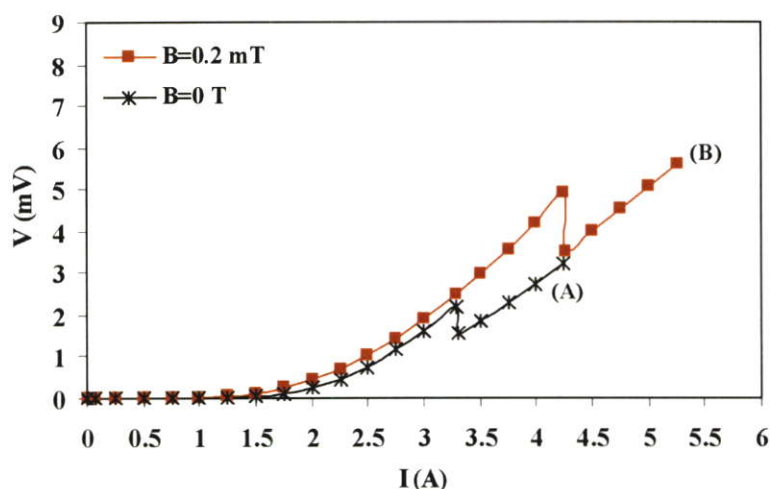
จากตารางที่ 6.1 และกราฟในรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กในช่วง 0-0.2 mT ค่า  $R_1$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้ค่า  $\Delta V$  มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเกินกว่า 0.2 mT ค่า  $R_2$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้ค่า  $\Delta V$  ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 6.4

## 6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคจากหัวข้อ 6.1 มาอธิบายผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 6.6 และผลจากตารางที่ 6.1 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.2 mT จากกราฟในรูปที่ 6.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าขณะยังไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก (กราฟ A) และขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.2 mT (กราฟ B) เมื่อพิจารณาข้อมูล จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่า ที่สนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.2 mT ชั้นสารจะมีค่า  $\Delta V$  สูงสุด และมีค่า  $R_1$ ,  $R_2$  และค่า  $R_{12}$  เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตำแหน่งกระแสจะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $I_N$ ) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ให้สนามแม่เหล็กภายนอก จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 6.9 สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_{EXT} = 0.2$  mT) จะไปทำลายส่วนนำไฟฟ้าที่ยังขาด บริเวณ Normal conduction part ในส่วนของ Part 2 (Gap 2) ให้ขาดเป็นบริเวณกว้าง ในขณะที่เดียวกันก็ไปทำลายจุดคอดของ Path 1 ให้เสียสภาพง่ายขึ้น โดยดูได้จากค่า  $I_C$  ที่มีค่าลดลง และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ชั้นสารเกินกว่าค่า  $I_C$  จุดคอดของ Path 1 ถูกทำลายกลายเป็น Normal conduction part ปริมาณส่วน

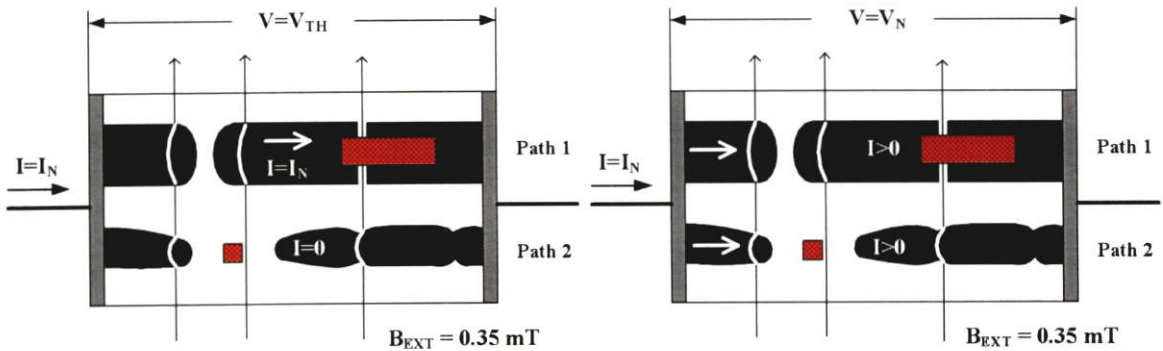
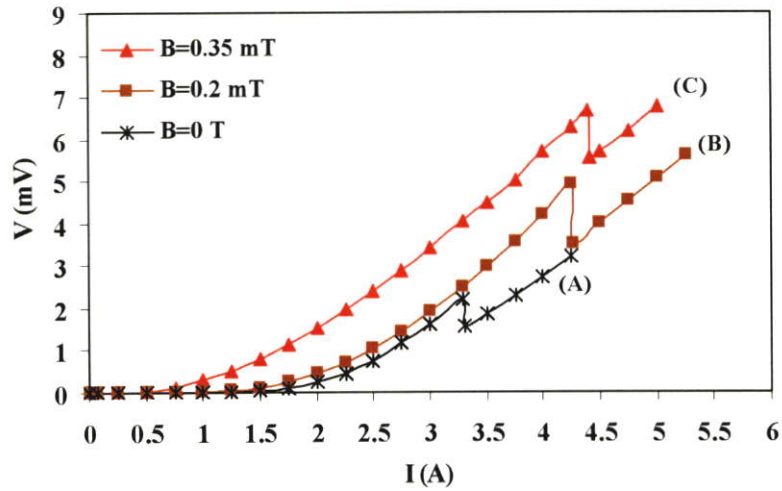
ขาดบริเวณนี้ (Gap1) มีปริมาณที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีการให้สนามแม่เหล็กเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม Gap1 มีความกว้างที่น้อยกว่า Gap 2 อยู่มาก กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านเฉพาะ Path 1 และเนื่องจาก Gap2 มีปริมาณที่กว้างมากนี้เอง จึงทำให้ต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่าน Path 1 เป็นปริมาณมากจึงจะทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบขึ้น (ดูได้จากค่า  $I_N$  ที่มีค่าถึง 4.25 A) ในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบขึ้น กระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านทั้ง Path1 และ Path2 ดังที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ 6.1 สิ่งที่น่าสนใจอยู่ที่ค่า  $\Delta V$  ที่มีค่าสูงสุด เพราะว่าสนามแม่เหล็กทำให้ Gap 1 กว้างขึ้น นั่นแสดงว่าค่า  $R_1$  มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\Delta V$  มีค่าสูงขึ้น โดยดูได้จากสมการที่ 6.4



รูปที่ 6.9 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.2 mT

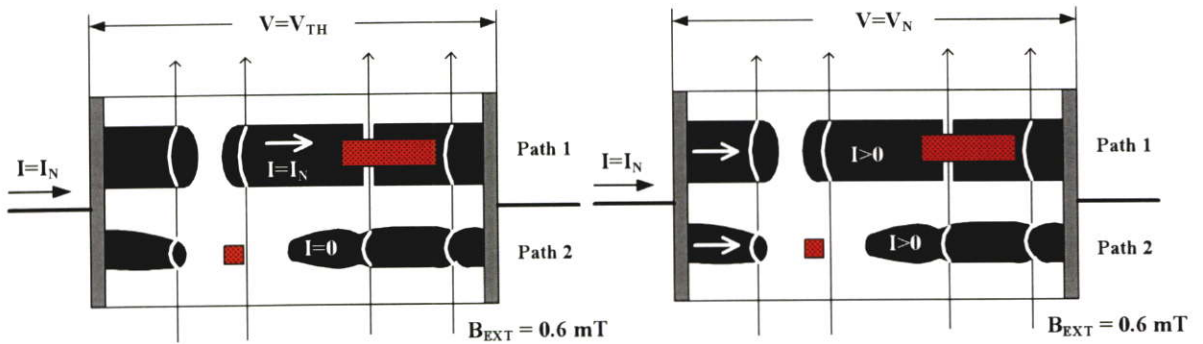
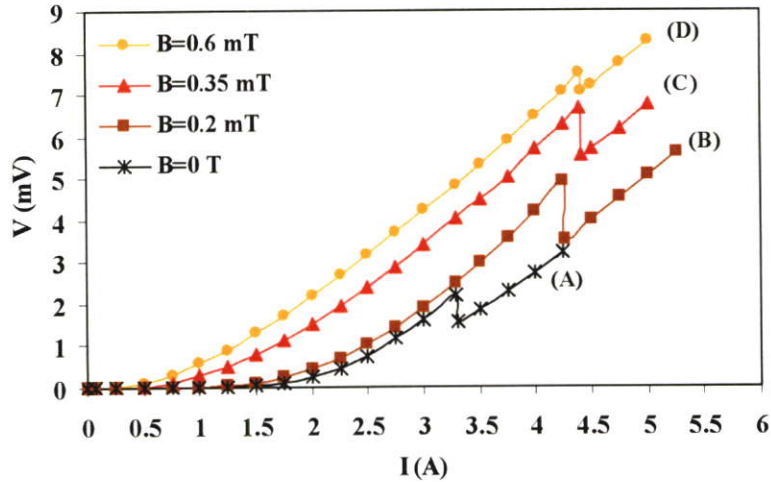
กรณีที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.35 mT จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta V$  มีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับ  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.2 mT จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 6.10 ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะช่วยทำลายส่วนขาดบริเวณ Path 1 ให้ขาดกว้างขึ้น ( $R_1$  เพิ่มขึ้น)

แต่เนื่องจาก Path 2 นั้นมีการเชื่อมต่อกันแข็งแรงน้อยกว่า Path 1 มาก สนามแม่เหล็กภายนอกจึงสามารถทำลาย Path 2 ให้เสียสภาพและขาดจากกันเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้ ค่า  $R_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ค่า  $\Delta V$  จึงมีค่าลดลง พิจารณาได้จากสมการที่ 6.4



รูปที่ 6.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.35 mT

กรณีที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก  $B_{EXT}$  เท่ากับ 0.6 mT จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าค่า  $\Delta V$  มีค่าลดลงอย่างมากแสดงดังรูปที่ 6.11 เพราะว่าปริมาณส่วนขาดที่ Path 2 มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ค่า  $R_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงทำให้  $\Delta V$  มีค่าลดลง



รูปที่ 6.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก เท่ากับ 0.6 mT

### 6.3 สรุป

จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในบทที่ 5 นั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่งแต่ยังไม่สามารถที่จะอธิบายรายละเอียดบางอย่างได้ อาทิเช่น ตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ( $I_N$ ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก ค่า  $I_N$  จะมีค่ามากกว่าในขณะที่ไม่มีกรให้สนามแม่เหล็กภายนอก ในบทที่6 นี้จึงได้นำเสนอแนวทางการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่สามารถอธิบายได้ทั้งในรูปแบบของ วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและในรูปแบบของการจำลองโครงสร้างมหภาค อีกทั้งยังเสนอแนวคิดในการใช้สมการพื้นฐานจากกฎของโอห์มมาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองอีกด้วย จากการวิเคราะห์ตัวอย่างผลการทดลองโดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้พัฒนาขึ้น สามารถอธิบายได้อย่างสอดคล้องมากขึ้น

## บทที่ 7

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้า อันได้แก่ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบ ( $\Delta V$ ) และค่ากระแสวิกฤต ( $I_C$ ) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O โดยการ

1. เปลี่ยนอุณหภูมิการเผาในช่วงการซินเทอรั้งที่อุณหภูมิต่างๆ
2. ให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆแก่ชิ้นสาร
3. ให้ชิ้นสารอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็กค่าต่างๆ

สำหรับผลของอุณหภูมิการเผาในช่วงซินเทอรั้ง สามารถควบคุมค่า  $I_C$  และค่า  $\Delta V$  ได้ในช่วงกว้างๆ โดย ค่า  $I_C$  สูงสุดเท่ากับ 2.2 A เกิดขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 930°C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่า  $I_C$  ลดลงตามลำดับ สำหรับ  $\Delta V$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.71 mV ที่ อุณหภูมิการเผา 945°C ซึ่งเป็นชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A

ค่าของ  $\Delta V$  และค่า  $I_C$  สามารถควบคุมให้มีค่าต่างๆได้อย่างละเอียดมากขึ้น โดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสาร สำหรับค่า  $\Delta V_{MAX}$  สูงสุดยังคงเกิดขึ้นที่ชิ้นสารที่มีค่า  $I_C$  เท่ากับ 1.05 A เมื่อให้สนามแม่เหล็กในช่วง 0-0.2 mT ค่า  $\Delta V$  จะเพิ่มขึ้นในช่วง 0.71-1.4 mV แต่ถ้าให้สนามแม่เหล็กมีค่าเกินกว่า 0.2 mT ค่า  $\Delta V$  ก็จะลดลง

ค่าของ  $\Delta V$  และค่า  $I_C$  สามารถควบคุมให้มีค่าต่างๆอย่างละเอียดได้อีกวิธีหนึ่งโดยการให้ชิ้นสารอยู่ในสภาวะการจำแม่เหล็กค่าต่างๆ ซึ่งก็สามารถควบคุมค่าต่างๆได้เป็นอย่างดี เหมือนกับการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก จากการทดลองพบว่า ค่า  $\Delta V_{MAX}$  จะเกิดขึ้นเมื่อชิ้นสาร มีการจำแม่เหล็กค่าต่ำๆ สำหรับจุดเด่นของการควบคุมค่า  $\Delta V$  และค่า  $I_C$  โดยวิธีนี้ก็คือ ไม่สิ้นเปลืองพลังงานที่จะต้องป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกอยู่ตลอดเวลาในขณะที่ทำการควบคุมค่าต่างๆ

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้นำเอาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มาอธิบายผลการทดลองทั้งหมด ซึ่งก็สามารถที่จะอธิบายได้อย่างสอดคล้อง และเพื่อให้แบบจำลองโครงสร้างมหภาคมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างมหภาคขึ้น ซึ่งสามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองได้ทั้งในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและในรูปของแบบจำลองโครงสร้างมหภาค

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jonathan L.Mayo. **Superconductivity The Threshold of a New Technology**. Tab Books, Inc. 1988
- [2] Daniel Hunt V. **Superconductivity Sourcebook**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1989
- [3] Joe Eck. “**Superconductor Information for the Beginner.**” [Online]. Available : <http://superconductors.org>. 1999.
- [4] Larbalestier D.C., Babcock S.E. and Seuntjens J. “Weak links and the poor transport critical current of the 123 compounds” **Physica C**, vol. 153-155, June, 1988, pp. 1580-1585
- [5] Nariki S., Sakai N. and Murakami M. “Processing of  $GdBa_2Cu_3O_{7-y}$  bulk superconductor and its trapped magnetic field” **Physica C**, 2001, pp. 629-634
- [6] Titiroongruang W. “**Study on Electromagnetic properties of YBaCuO Bulk Superconducting Material and Its Application.**” Doctor of Engineering in Electronic Engineering, Tokai University. 1995
- [7] Kim Y.B., Hempstead C.F. and Strnad A.R. “Flux-Flow Resistance in Type-II Superconductors” **PHYSICAL REVIEW**, vol. 139, no. 4A, August 1965. pp. 1163-1172
- [8] Khunkhao S., Suriyaamaranon C., Titiroongruang W. and Supadech S. “**Isotropic HTSC-Type Magnetic Sencor**” The 16<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering, Thailand, November, 1993. pp. 394-399
- [9] Titiroongruang W., Akiba Y., Supadech S., Kurosu T. and Iida M. “Macrostructure Model of Y-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials” **Proc. of the Faculty of Engineering Tokai University**, vol. 17, 1991. pp. 7-13
- [10] W. Wongsuttitum “ **Study on Negative Resistance Phenomena in Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials**” Master of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Thailand. 2002
- [11] W. Wongsuttitum, N. Sittipon and W.Titiroongruang “Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials” **24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference**, Thailand, vol. 2, November, 2001. pp. 992-997

- [12] W. Titiroongruang, W. Wongsuttitum and M.Iida “Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Ceramic Materials” **Japanese Journal of Applied Physics**, vol. 46, no. 4A, 2007. pp. 1474-1477
- [13] Wales J. and Sanger L. “**Wikipedia The Free Encyclopedia**” [Online]. Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page). 2001
- [14] Launceston College “**Physics**” [Online]. Available : <http://www.launc.tased.edu.au/online/sciences/physics/tutes1.html>.
- [15] Terry P. Orlando, Kevin A. Delin “**Foundations of Applied Superconductivity**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1991
- [16] Boonrengsup P. “**A Study on Characteristics of YBCO/GBCO Superconducting Junction**” Master of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang Thailand. 2001
- [17] “Preparation of High Temperature Superconductors” **Workshop on High Temperature Superconductivity Research, Thailand, December, 1994**, pp. 171-190
- [18] W. Wongsuttitum, W. Titiroongruang and M.Iida “The Relation of Critical Current Negative Resistance and External Magnetic Field in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Material” **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference (ECTI)**, Thailand, May, 2007. pp. 105-108
- [19] Kikegawa T.S., Sasaki H., Tada H. and Murakami M. “Measurement of Critical Current for Bulk Superconductors by Transport Method” **Physica C**, 2005, pp. 649-653
- [20] Akiba Y., Titiroongruang W., Kurosu T., Iida M. and Nakamura T. “Electromagnetic Memory Effect in Superconducting Y-Ba-Cu-O System” **Oyo Buturi** 58, Japan, 1989, pp.151-160
- [21] Piyananjaratsri R., Wongsuttitum W., Titiroongruang W. and Iida M. „The Effect of External Magnetic Field on Negative Resistance Phenomena in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Ceramic Materials” **Laos Journal on Applied Science**, vol. 1, no. 1, November, 2006 ,pp. 223-230
- [22] P. Khwanmuang, W. Wongsuttitum, W.Titiroongruang “The Effect of Electromagnetic Memory on Negative Resistance Phenomena in Superconducting Gd-Ba-Cu-O System” **Proc. of The Siam Physics Congress**, Thailand, 2006, pp. 41-43

- [23] W. Wongsuttitum, W. Titiroongruang and M. Iida “The Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  Superconducting Material” **The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Hong Kong, July 2007.**
- [24] A-K Mohamed M., Jung J., and Franck J.P. “Trapped flux, diamagnetic shielding and Meissner effect in a disk of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ” **PHYSICAL REVIEW B**, vol. 39, no. 13, May, 1989, pp. 9614-9617
- [25] Anderson P.W. “Theory of Flux Creep in Hard Superconductors” **PHYSICAL REVIEW LETTERS**, vol. 9, no. 7, October, 1962, pp. 309-311

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก.

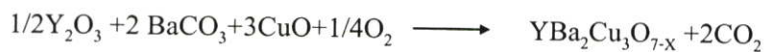
กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

## กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

### 1. การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

สำหรับธาตุที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วย อิทเทรียม แบเรียมและทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu}$  เป็น  $1 : 2 : 3$  อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุด

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้



จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้  $\text{Y} = 88.905$  กรัม,  $\text{Ba} = 137.34$  กรัม  
 $\text{Cu} = 63.546$  กรัม,  $\text{C} = 12.011$  กรัม,  $\text{O} = 15.99$  กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$\text{Y}_2\text{O}_3 = (2 \times 88.905) + (3 \times 15.99) = 225.807 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{BaCO}_3 = 137.34 + 12.011 + (3 \times 15.99) = 197.348 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{CuO} = 63.546 + 15.99 = 79.545 \text{ กรัม/โมล}$$

การคำนวณจากสมการเคมี

1) $\text{Y}_2\text{O}_3$	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 225.807	กรัม
ถ้า	$\frac{1}{2}$	โมล	ต้องเตรียมสาร = 112.9035	กรัม
2) $\text{BaCO}_3$	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 197.348	กรัม
ถ้า	2	โมล	ต้องเตรียมสาร = 394.696	กรัม
3) $\text{CuO}$	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 79.545	กรัม
ถ้า	3	โมล	ต้องเตรียมสาร = 238.635	กรัม

$$\begin{aligned} \text{มวลโมลของสารตั้งต้นทั้งหมด} &= 112.9035 + 394.696 + 238.635 \\ &= 746.2345 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

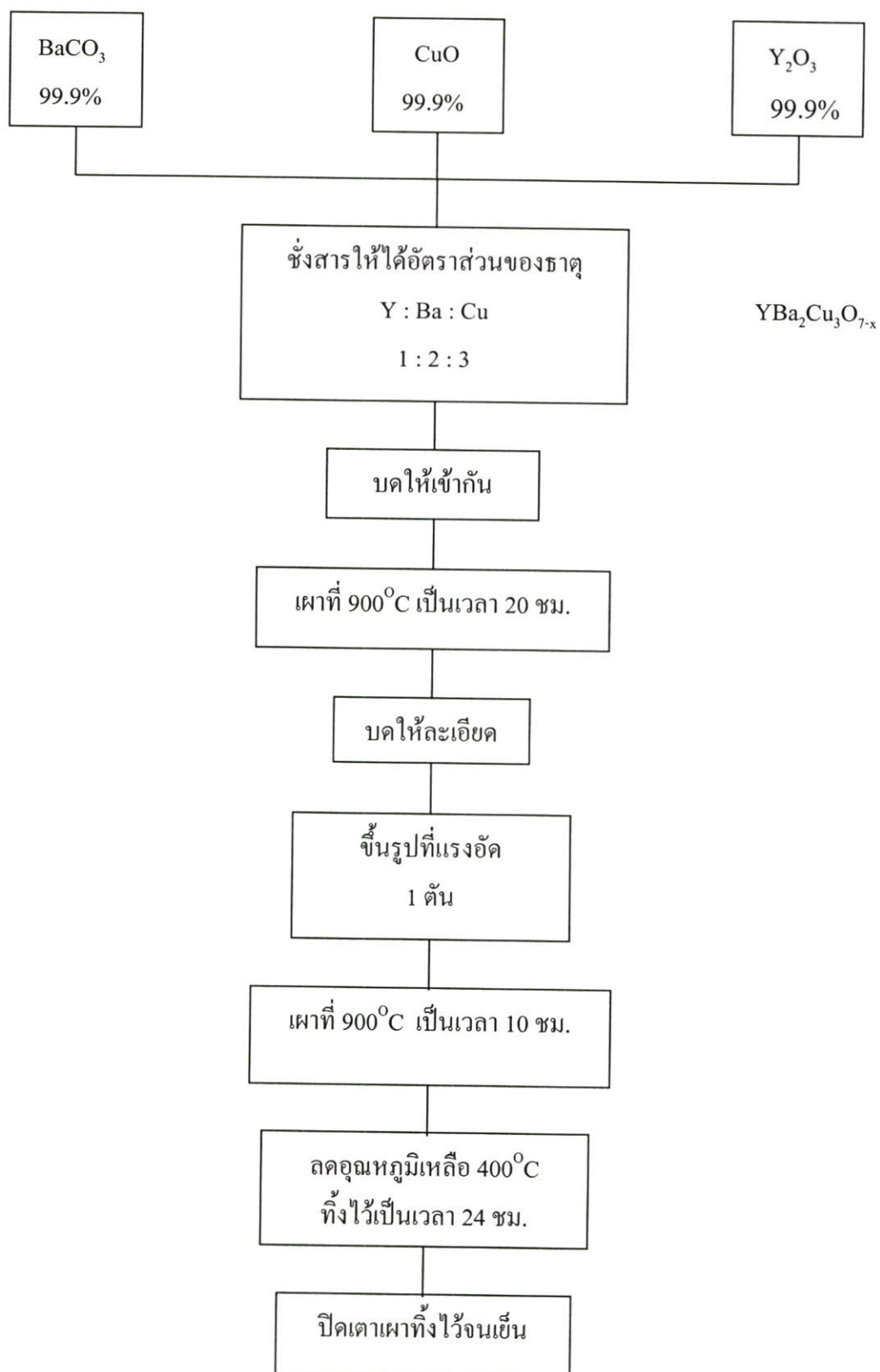
ซึ่งหมายความว่าให้ได้สาร  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} = 746.2345$  กรัม

ปริมาณ  $x$  หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากสารตั้งต้นทั้งหมด 746.2345 กรัม ถ้าต้องการ  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้ อิทเทรียม ออกไซด์ 1.513 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 5.289 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 3.198 กรัม

## 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

1. ชั่งสารประกอบ  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$  และ  $CuO$  โดยใช้อัตราส่วน  $Y : Ba : Cu$  เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $900^\circ C$  ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ  $900^\circ C$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ  $400^\circ C$  อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา



รูปที่ ก-1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O

ตาราง ก คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  และ  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

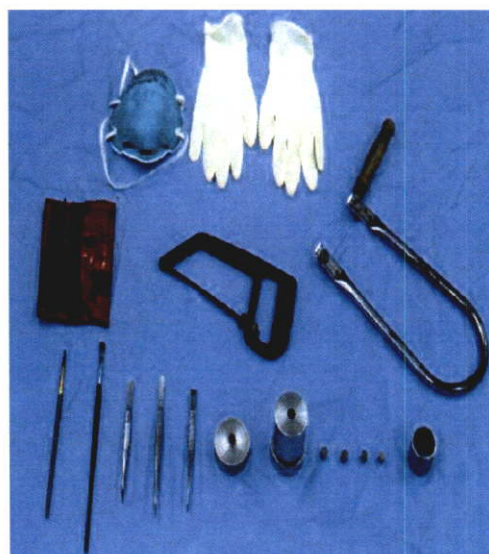
ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )
Y	88.905	1,509	2,927
Gd	157.26	$1,312 \pm 15$	3,270
Ba	137.34	$725 \pm 5$	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.99	-218.8	-183
C	12.011	3,827	3,727

ภาคผนวก ข.  
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

## เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### - อุปกรณ์ในการขึ้นรูปสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

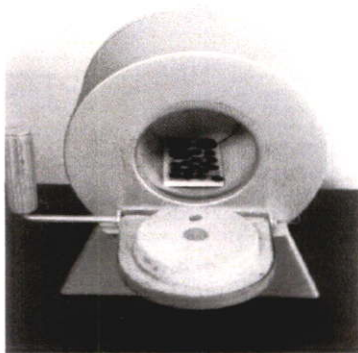
ในการขึ้นรูปสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้จากกระบวนการสร้างนั้นจะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก โดยมีแรงอัดตั้งแต่ 0-10 ton/cm<sup>2</sup> และอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ ข-1 ได้แก่ ชุดเบ้าอัด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เลื่อยเหล็กและฉลุ ชุดตะไบ พู่กัน ถุงมือ และที่ปิดจมูกกันฝุ่น



รูปที่ ข-1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นสาร

### - เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ ( Furnance and Temperature control )

เป็นเตาเผาอุณหภูมิสูง (1050 องศาเซลเซียส) เตามีลักษณะเป็นทรงกระบอกประกอบด้วยท่อเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบขดลวดใช้ไฟฟ้า 220 โวลต์ ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะต่อร่วมกับเตาเผาโดยใช้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-1000 องศาเซลเซียส เป็นการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้คงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จากตัวควบคุมไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัดต่อไฟเลี้ยงขดลวดความร้อนของเตาเผา



รูปที่ ข-2 เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้าง

#### - ชุดบัดกรีอัลตราโซนิก

ในการบัดกรีตัวนำไฟฟ้าที่ยังขูดประเภทเซรามิกนี้ต้องใช้เทคนิคพิเศษในการต่อขั้วสาย ประกอบด้วย ตะกั่วที่มีจุดหลอมเหลวต่ำผสมอินเดียมและชุดบัดกรีอัลตราโซนิก ซึ่งในส่วนของชุดบัดกรีอัลตราโซนิกจะมีการสั่นของหัวบัดกรี ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัดกรีและชิ้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก



รูปที่ ข-3 ชุดบัดกรีอัลตราโซนิก

#### - ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าที่ยังขูดนั้นจะใช้ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (D.C. current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



รูปที่ ข-4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### ภาคผนวก ก.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. W. Wongsuttitum, W. Titiroongruang and M. Iida “The Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Material” , The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Hong Kong, July 2007.
2. W. Wongsuttitum, W. Titiroongruang and M. Iida “The Relation of Critical Current Negative Resistance and External Magnetic Field in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Material” , Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference (ECTI), Thailand, pp. 105-108, May 2007.
3. W. Titiroongruang, W. Wongsuttitum and M. Iida “Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Ceramic Materials” , Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.4A, April 2007, pp. 1474-1477.



## Conference Handbook

The International Conference on

# Electrical Engineering

**I**ntelligent  
**C**lean  
**E**fficient  
**E**lectricity

for the 21st Century with focus  
on **Sustainability** and **Reliability**

8-12 July 2007 • Hotel Nikko Hongkong



HKIE



CSEE



IEEJ



KIEE

**ORGANISED BY**

The Hong Kong Institution of Engineers (HKIE)

**CO-ORGANISED BY**

The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)  
The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)  
The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)

**SPONSORED BY**

CLP Power Hong Kong Limited  
The Hongkong Electric Co., Ltd.

CLP 中電

港燈  
HK Electric

# The Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ Superconducting Material

WONGSUTTITUM, Wisit TITIROONGRUANG, Wisut

Electronics Research Center, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok, Thailand  
visit13@yahoo.com

HIDA, Masamori

Tokai University Junior College  
(TAKANAWA CAMPUS)

## Abstract

The Current-Voltage characteristics of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconductor have been investigated at 77 K. We found that the negative resistance phenomenon was occurred. The voltage drop across the superconducting sample is observed on applying an external magnetic field. After the removal of the magnetic field, the voltage drop continues to appear. This phenomenon is considered as nonvolatile memory effect. The voltage drop increases with increasing applied magnetic flux, but it becomes constant at about 10 mT. The appearance of the voltage drop is ascribed to the trapping of magnetic flux. While Negative resistance is occurring, the memorized state affects directly to the magnitude of differential voltage ( $dV$ ). The mechanism of memory effect and Negative resistance can be sufficiently explained by the hypothesis of macrostructure model of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconducting ceramic materials.

## KeyWords

Negative resistance, macrostructure model

## 1. INTRODUCTION

When current greater than the critical current, pass through a type II superconductor in the mixed state, flux lines are driven into a viscous-flow state by increasing the Lorentz force  $J \times H$  exceed pinning force, the voltage observed under this condition. The voltage increases with current. The slope,  $dV/dI$ , is the flux flow resistance of the superconductor in the mix state arising from a viscous flow of vortex. The increasing slope,  $dV/dI$  until the line flux flow region is attained [Kim et al, 1965]. We had interested in the report about Negative Resistance phenomenon in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconductor [Wongsuttitum et al, 2001]. We found that external magnetic field also influences to magnitude of differential voltage ( $dV$ ) while Negative Resistance is occurring. The previously researches of Wisut et al [Titiroongruang et al, 1991] introduced macrostructure model of type II superconducting ceramic materials. It brings us to the development of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  model which agrees with our investigated results.

## 2. EXPERIMENT METHODS

In this experiment, we prepared the  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconducting samples by following conventional solid state reaction method [Boonrengsap et al, 1999].  $Gd_2O_3$ ,  $BaCO_3$  and  $CuO$  powders of 99.9% purity were grinded and mixed together and calcined at  $930^\circ C$  for 20 hours. After that, they are reground again for 1 hour. The powders were pressed into pellets with a pressure of  $1 \text{ ton/cm}^2$ . The diameters of them are 10 mm and 3 mm thickness. For the next step, the pellets were sintered at  $945^\circ C$  for 10 hours, slowly cooled down to  $450^\circ C$ , held for 24 hours, and then cooled down slowly. We had experimentally investigated the following effects on trapped magnetic flux with in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  bulk. The current-voltage characteristics were measured by the four probe technique with indium electrodes at 77 K. The magnetic field is applied to sample perpendicular with the direction of current flow.

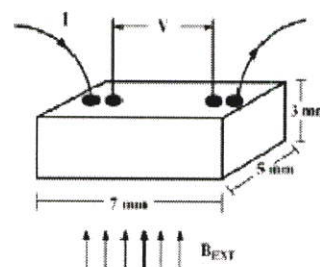


Fig. 1 Schematic representation of the superconducting sample and direction of magnetic field

## 3. EXPERIMENT RESULTS AND DISCUSSION

As shown in Fig. 2, curves (A) and (C) were taken at  $B = 0 \text{ T}$ , the curve (B) at  $B = 4.8 \text{ mT}$  at 77 K. The curve (B) gradually approaches the curve (C) and fixes after the removal of the external magnetic field. If the voltage is applied again after returning to zero voltage, current-voltage characteristic curve shows the same as curve (C). This means that the sample is in the memory

state. So that, the curve (C) is corresponding to a memory state.

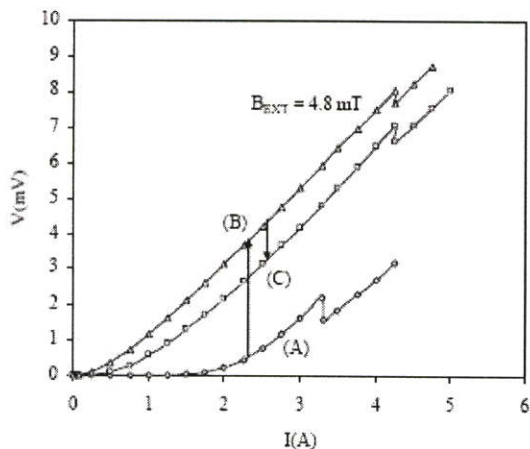


Fig. 2 Current-voltage characteristics which show the result of electromagnetic memory

From the results in Fig. 3, the symbols  $V_{MAG}$  and  $V_{MEM}$  are the appeared voltage drop across the sample with existence of the external magnetic field and the memorized voltage of the sample after the removal of the external magnetic field, respectively.

The curve of  $V_{MAG}$  versus  $B_{EXT}$  was obtained in external magnetic field. The curve of  $V_{MEM}$  versus  $B_{EXT}$  was measured after the removal of the magnetic field. It is found from the results that, in the range of magnetic flux less than 1.6 mT, the voltage drop across the superconducting sample becomes to zero after the removal of magnetic field, this is, no memory effect is observed.

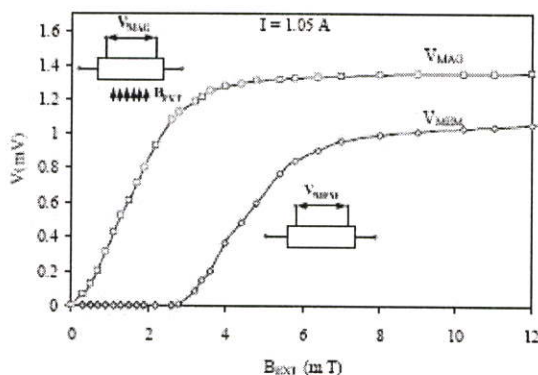


Fig. 3 Dependence of the voltage drop on external applied magnetic flux

From Fig. 4 it's shown the effect of electromagnetic memory on  $\Delta V$ . Note that the curves of  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  versus  $B_{EXT}$  were measured after the removal of the

external magnetic field. It's found that when the samples memorized low magnetic field,  $\Delta V$  was increased. However, when  $V_{MEM}$  exceeded 0.0023 mV,  $\Delta V$  started to decrease.

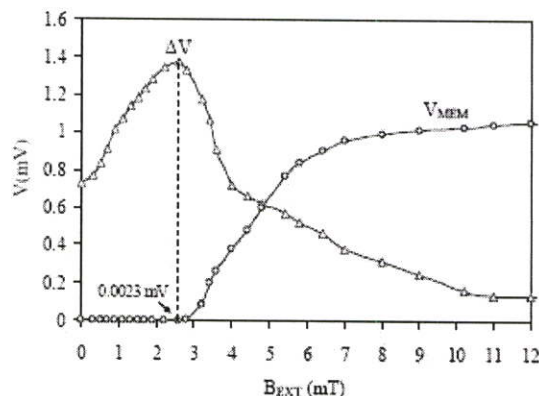


Fig. 4 The plot of  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  vs  $B_{EXT}$

From Fig. 5 shown the voltage drop  $V_{MEM}$  across the memorized sample and  $\Delta V$  versus  $B_{EXT}$  after the removal of the external magnetic flux. The direction of external applied magnetic flux is opposite to the direction of magnetic flux trapped in the memorized sample. The memory is erased by applied magnetic flux less than 3.2 mT. On the other hand, the voltage drop increases again, since the applying of magnetic flux causes the memory effect in the range more than 3.2 mT.

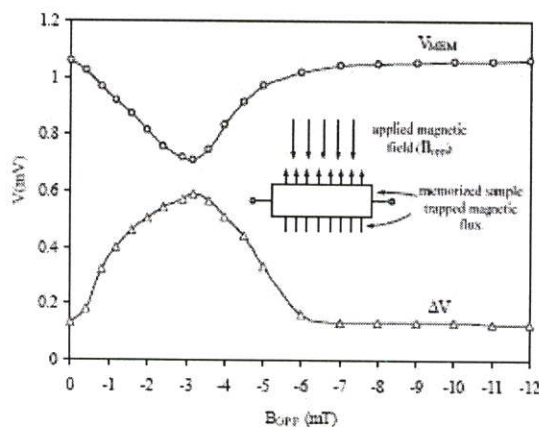


Fig. 5 The voltage drop  $V_{MEM}$  across the memorized sample and  $\Delta V$  vs.  $B_{EXT}$  in direction that's opposite to trapped flux (after removal  $B_{EXT}$ )

Figure 6 shows decays of trapped flux in the memorized sample, if the sample memorized low magnetic field ( $V_{MEM} < 0.01$  mV). No change in  $V_{MEM}$

is observed

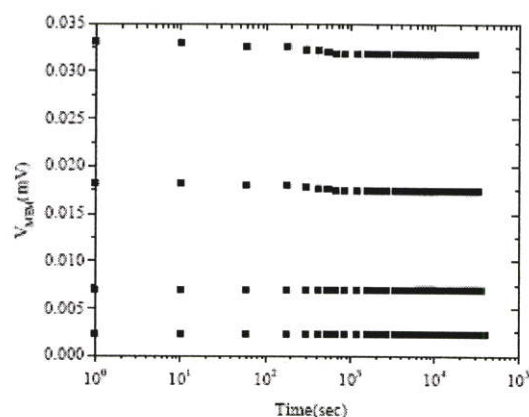
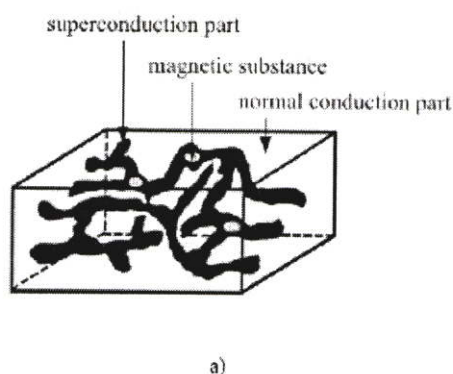
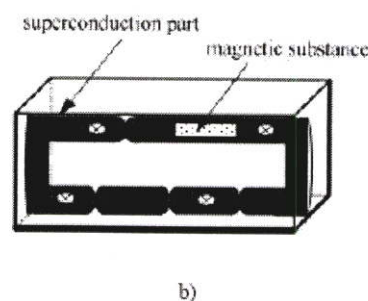


Fig. 6 Shows decays of trapped flux in the memorized sample

Fig. 7 shows macrostructure model of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  hypothesis. Material discussed here is considered to be composed of the two parts, that is, the superconduction part and the normal conduction part [Akiba et al, 1989]. This situation is shown in Fig. 7(a). In this figure, the part except the black part means the normal conduction part. It is assumed that the shape of the superconduction part is very complicated like that of the jungle gym, so that there exist both wide and narrow parts. The narrow part corresponds to the weak link region. In other words, the narrow part will be cut off first, when superconducting state is destroyed. Superconduction part has magnetic substance which ascribes to Gadolinium. The simplified macrostructure model is shown in fig. 7(b). The mark  $\times$  in superconduction part means a defect region where the appropriate value of magnetic flux can be trapped. The current-voltage characteristic of the superconducting ceramic is shown in Fig. 8. This characteristic can be explained by macrostructure model, as follows.



a)



b)

Fig. 7 The proposed model of the  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic material  
a) Macrostructure model.  
b) Simplified model.

From Fig. 9 a), when the applied current ( $I$ ) is equal to (or less than) its critical current ( $I_C$ ) value, the superconduction parts are connected at both sides of sample. Then, the resistance of sample does not appear. But when  $I > I_C$ , superconduction part will be cut-off because of weak point region is destroyed. The resistance appears in this condition. Since amount of upper destroyed parts are less than lower destroyed parts, all current will flow over the upper part only. Then, the voltage drop will across the upper part. Until we apply current reach  $I_N$ . The upper superconduction part, where has magnetic substance, is destroyed. Thus, overall cut-off region of the upper part is more than lower part. The resistance of upper part increases quickly. Then all current flows to lower part, which has low resistance. Therefore, the voltage drop across sample decreases immediately. This phenomenon is called as Negative-resistance. The magnitude of differential voltage is about 0.71 mV.

When we applied low magnetic field as shown in Fig. 9b), the magnetic flux can not penetrate the defect regions (represented by mark  $\times$ ). The memorized state doesn't present. In addition, when external magnetic field is applied adequately. For example, the magnetic flux of  $B_{EXT} = 2.6$  mT can penetrate through the defect regions, which causes the induce current (called persistent current). This persistent current will cause the occurrence of a constant magnetic flux ( $B_{TRAP}$ ), too. With the effect of this  $B_{TRAP}$ , some regions of the superconduction part are continuously cut-off although the  $B_{EXT}$  is removed out. It causes to appear the voltage drop across the sample ( $V = V_{MEM}$ ), but is different in magnitude with  $V_{MAG}$ . Usually, the value of  $V_{MAG}$  is larger than the value of  $V_{MEM}$  because the magnitude of  $B_{EXT}$  is larger than  $B_{TRAP}$ . When we applied current reaches to  $I_N$ , the superconduction part, which has magnetic substance, is destroyed. At the same time,  $B_{TRAP}$  will destroy the superconduction part in this area, too. Then, the present  $\Delta V$  is more than  $\Delta V$ , which is obtained in the condition of no memorized state sample. When magnetic flux ( $B_{EXT}$ ) is increased to 10 mT as shown in Fig. 9 c), it can penetrate through

overall defect regions. Then,  $B_{\text{Trap}}$  was increased. While negative resistance was occurring, the cut-off region where has magnetic substance was widely broadened by  $B_{\text{Trap}}$ . In addition,  $B_{\text{Trap}}$  also destroyed lower part, too. Then, it caused the decrease in  $\Delta V$ .

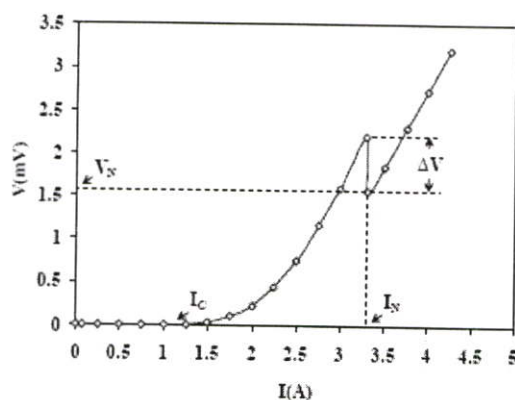


Fig. 8 Current-Voltage characteristics

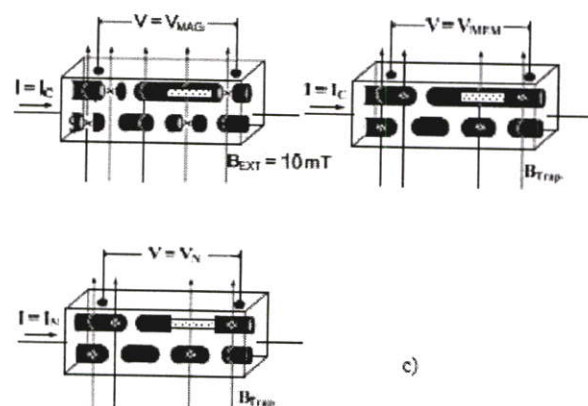
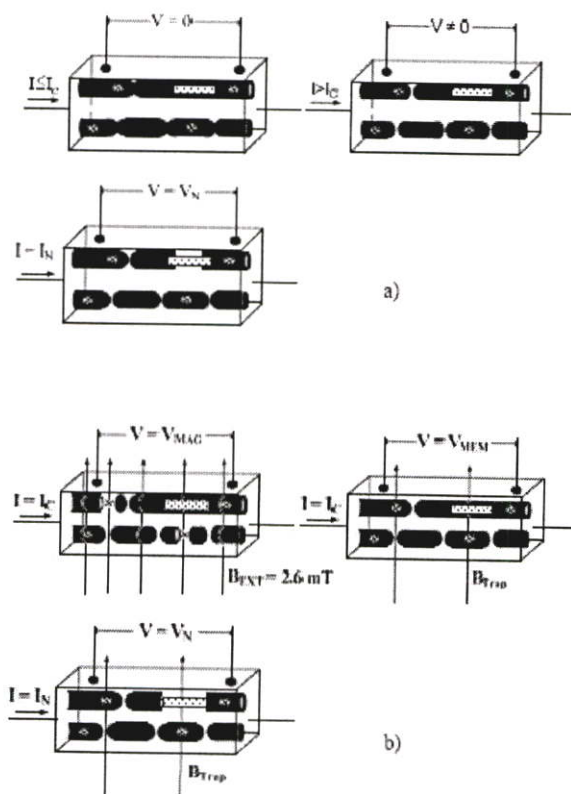


Fig. 9 Macrostructure model responsible for the occurrence of the voltage drop across the sample caused by applied magnetic field.

#### 4. CONCLUSIONS

From the investigation of Current-Voltage characteristics in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic material, Negative resistance phenomenon is found. For the study of some magnetic properties of this material, we applied external magnetic field to sample. When magnetic field was removed, we found that voltage still dropped across the sample. This phenomenon is called as Magnetic Memory. When the sample starts to memorize magnetic field by  $B_{\text{EXT}}$ , the high different voltage was obtained. Subsequently, it's gradually decreasing while magnetic memorization was increasing. When we made magnetic pole reversal, magnetic memorization was decreased and different voltage increased. On the other hand, different voltage will be decreased, when  $V_{\text{MEM}}$  was increasing. Some experimental results can be quite explained by macrostructure model of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic materials.

#### Acknowledgements

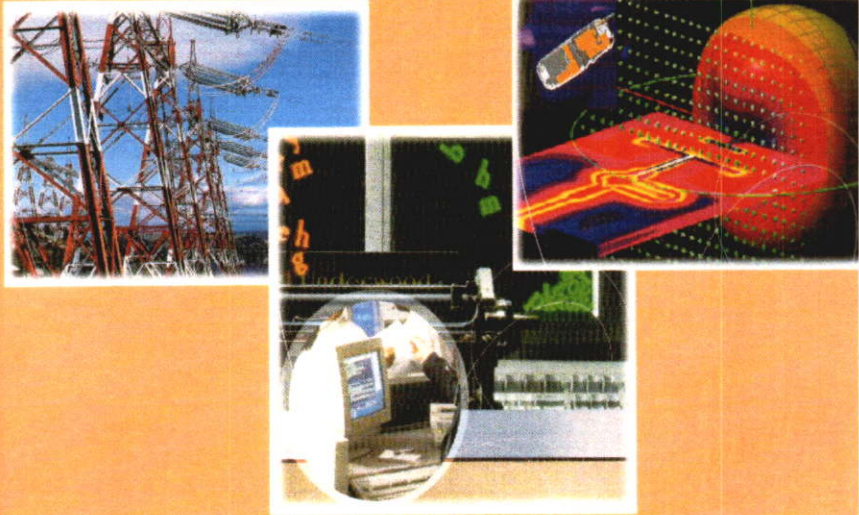
We are indebted to L. Supadee at Western Digital (Bangpa-in) and, C. Suriyaamaranont for technical assistance

#### References

- Y. B. Kim, C.F. Hempstead, A. R. Stmad.,1965, Flux-Flow Resistance in Type-II Superconductors *Phys.Rev.*, 139, No.4A, 1965, A1163-1172.
- W. Wongsuttitum, W. Titroongruang., 2001, Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials, *Proc. Of Thailand's 24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, (2001), pp. 992- 997

- W. Titiroongruang, Y. Akiba, S. Supadech, T. Kurosu and M. Iida., 1991, Macrostructure Model of Y-Ba-Cu-O System, *Proceeding of Faculty of Engineering, Tokai University*, (1991) 17, pp. 7-13.
- P. Boonrengsap, S. Panakasem, D. Yossaktri, and W. Titiroongruang., 1999, Find of Sintering Temperature Condition for  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ , *Proc. Of Thailand's 37<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference*, (1999), pp. 378-383.
- Y. Akiba, W. Titiroongruang, T. Kurosu, M. Iida and T. Nakamura., 1989, Electromagnetic Memory Effect in Superconductivity Y-Ba-Cu-O System. *Oyo Butsuri* 58 No. 1 (1989) 151. [in Japanese]

**VOLUME I**



# ECTI-CON 2007

**Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand  
May 9-12, 2007**

## **VOLUME 1**

- *Circuits and Systems*
- *Control Engineering*
- *Electrical Power Engineering*
- *Other Related Fields*



**ECTI**  
Association

**IEEE**  
THAILAND SECTION

**NECTEC**  
a member of NSTDA

**WD** Western  
Digital



# The Relation of Critical Current Negative Resistance and External Magnetic Field in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconducting Material

Wisit Wongsuttitum, Wisut Titiroongruang and Masamori Iida\*

Electronics Research Center, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

\*Tokai University Junior College, Tokyo, Japan

**Abstract-** The investigation of current - voltage characteristics in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  bulk superconductors at 77 K, it is found that the negative resistance phenomenon is appear at low critical current in the range of 0.12-1.55 A. Moreover, the magnitude of differential voltage ( $\Delta V$ ) depends on critical current and applied magnetic field. The samples were prepared by varying sintering temperature. Furthermore, external magnetic field was also applied to samples for studying the effect of magnetic field on electrical properties. The experimental results can be well explained by the hypothesis of macrostructure model of Gd-Ba-Cu-O bulk superconducting material.

## I. INTRODUCTION

In general, the high temperature superconductor (HTSC)  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  is prepared by the conventional solid state reaction method.  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  and  $\text{CuO}$  powders of 99.9 % purity were mixed and calcined at  $930^\circ\text{C}$  for 20 hours. After that, the calcined cakes were crushed in an alumina mortar. The powders were pressed into the pellets with a pressure of  $1 \text{ ton/cm}^2$ . The diameter of them is 10 mm and 3 mm thickness. For the next step, the pellets were sintered at  $945^\circ\text{C}$  for 10 hours, slowly cooled down to  $450^\circ\text{C}$ , held for 24 hours, and then cooled down slowly. Sintering temperature influence to superconducting state which directly depends on critical current.

The fabricated superconductor shows the properties of a ceramic consist of the magnetic substance which is presented by Gadolinium. From the hypothesis of a macrostructure model of the  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic material [1], consists of superconduction part and normal conduction part [2], [3]. The presence of the superconducting state of samples shows the continuous connection of superconduction part. The shape of the superconduction part is very complicated like that of jungle gym, so that, they exist in the form of both wide and narrow paths. The narrow path is considered to be the weak point region. In the other words, the narrow region will be cut-off first whenever superconducting state is destroyed under the appropriate condition, such as application of magnetic field. However, superconduction part still composes of magnetic substance. This situation is shown

schematically in Fig. 1a). Fig. 1b) shows the simplified macrostructure model of HTSC materials on the basis of the structure mentioned above.

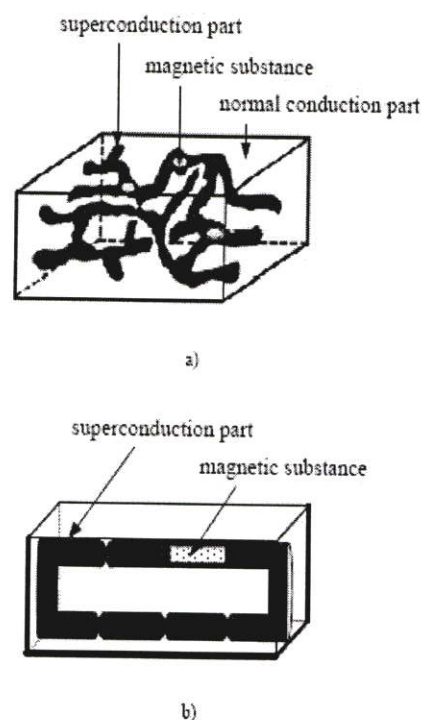


Figure 1. The proposed model of the  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}$  superconducting ceramic material

- a) Macrostructure model
- b) Simplified model

## II. EXPERIMENTAL

Ceramic sample of Gd 1:2:3 were prepared by conventional powder processing from high-purity oxides and carbonates, calcining at 930°C, the powder were pressed into pellets with a pressure of 1 ton/cm<sup>2</sup>. The pellets were sintered at 900°C, 920°C, 925°C, 930°C, 935°C, 940°C, 945°C, 950°C, 955°C, 960°C, 965°C and 970°C for 10 hours.

We had experimentally investigated the following effect of external magnetic field on current-voltage characteristics and magnitude of negative resistances. The current-voltage characteristics were measured by the four probe technique with indium electrodes at 77 K. The magnetic field is applied to samples perpendicular with the direction of current flow.

## III. EXPERIMENTAL RESULTS

### A. The Optimum condition of critical current for the occurrence of negative resistance

From Fig. 2 shown the relationship between sintering temperature and critical current ( $I_C$ ). It's found that, the highest  $I_C$  is 2.2 A at sintering temperature 930°C. At the highest  $I_C$  sample must be applied external magnetic field ( $B_{EXT}$ ) higher than the low  $I_C$  sample, to destroy the superconducting state. However the negative resistance could not be observed at this highest  $I_C$ . But negative resistance obviously occurred as  $I_C$  is reduced from maximum point.

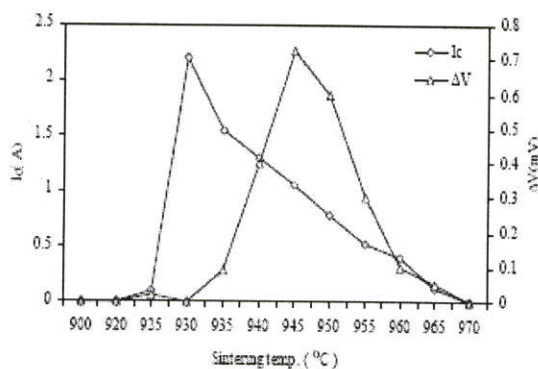


Figure 2. The plot of  $I_C$ ,  $\Delta V$  vs sintering temperature

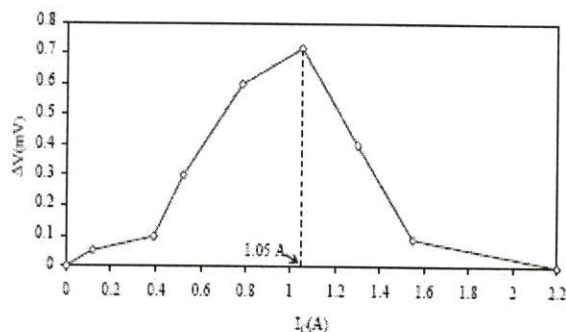


Figure 3. Dependence of  $\Delta V$  on  $I_C$

The maximum magnitude of difference voltage ( $\Delta V$ ) is obtained at  $I_C = 1.05$  A.  $\Delta V$  will be to zero while  $I_C$  is decreased to zero as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Thus, it can be seen that the negative resistance phenomena is apparently found in the range of low  $I_C$ .

### B. The effect of magnetic field on magnitude of negative resistance

The influences of  $B_{EXT}$  on the magnitude of differential voltage ( $\Delta V$ ) are studied. Sample used here show the various values of critical currents which are 1.55A, 1.3A, 1.05A, 0.78A, 0.52A, 0.39A and 0.12A respectively. Current-voltage relations and the dependences of  $\Delta V$  on  $B_{EXT}$  are shown in Fig.4. It's found that the magnitude of  $\Delta V$  depends on  $B_{EXT}$  [4]. For example, for the sample with  $I_C = 1.05$  A, when we applied  $B_{EXT}$  from 0 to 0.2 mT,  $\Delta V$  was increased. However if applied  $B_{EXT}$  exceeded 0.2 mT, then  $\Delta V$  was decreased continuously. The maximum  $\Delta V$  ( $\Delta V_{MAX}$ ) was obtained at 1.4 mV.

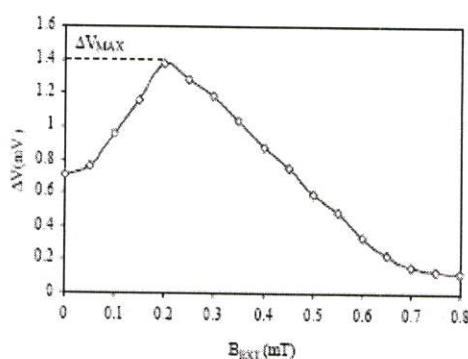
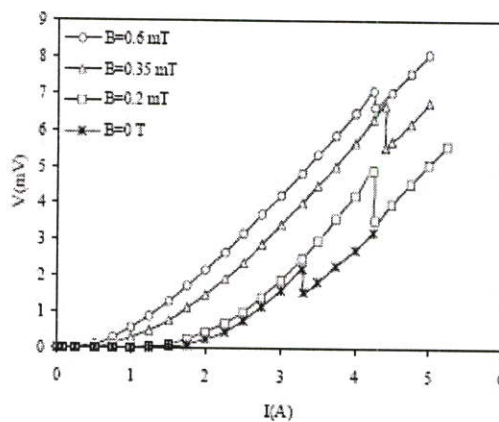


Figure 4. The effect of  $B_{EXT}$  on samples with various  $I_C$

Fig. 5 shows  $\Delta V$  versus  $B_{EXT}$  relations obtained from sample with various critical current. It is found from Fig. 6 that the sample with  $I_C = 1.05$  A shows the highest value of  $\Delta V_{MAX}$  comparing with other  $I_C$  samples.

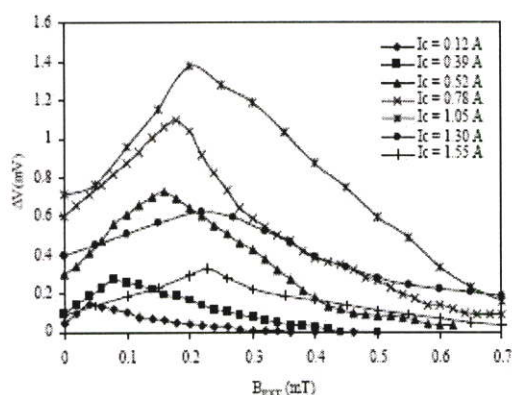


Figure 5. The plot of  $\Delta V$  vs  $B_{EXT}$  at various  $I_C$

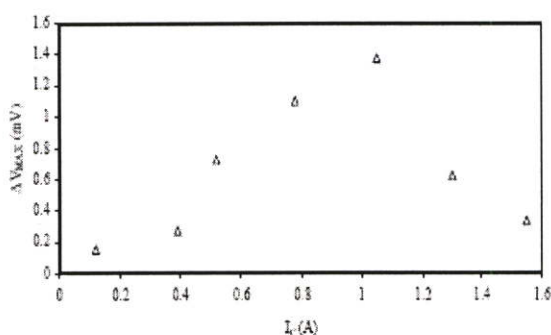


Figure 6. The relationship between  $\Delta V_{MAX}$  and  $I_C$

#### IV. DISCUSSIONS

The experimental results can be explained by the macrostructure model of Gd-Ba-Cu-O. Since the high- $I_C$  sample exhibits superconducting state more completely than the low- $I_C$  sample, then the connection of weak point region must be stronger than the low- $I_C$  sample as shown in Fig. 7.

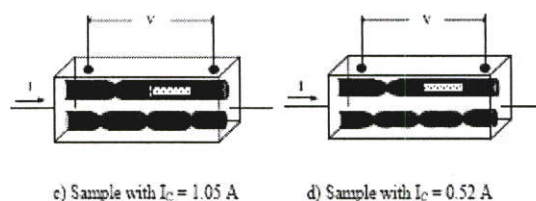
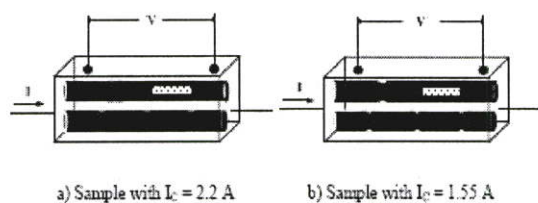


Figure 7. Illustration of a macrostructure model at various  $I_C$

From Fig. 8, when the applied current ( $I$ ) is equal to (or less than) its critical current ( $I_C$ ) value, both sides of the sample are connected by the superconducting parts. Then, the resistance of sample does not appear. But when  $I > I_C$ , superconducting part will be cut-off, because weak point region is destroyed. The resistance appears in this condition. Because the volume of upper destroyed parts are less than lower destroyed parts, all current will flow over the upper part only. Then, the small voltage drop will appear across the upper part. When the current reaches  $I_N$ , the upper superconducting part, where has magnetic substance, is destroyed. Thus, overall cut-off region of the upper part is more than lower part. The resistance of upper part increases quickly. Then all current flows to lower part, which has low resistance. Therefore, the voltage drop across sample decreases immediately. This phenomenon is called Negative-resistance. The magnitude of differential voltage ( $\Delta V$ ) is about 0.71 mV.

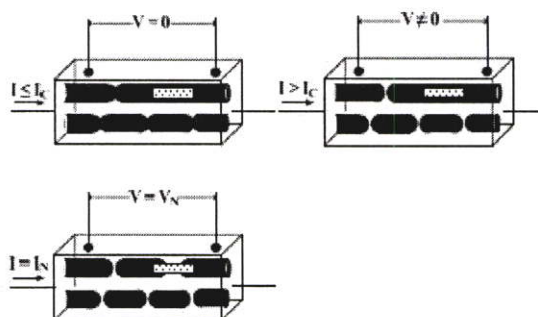
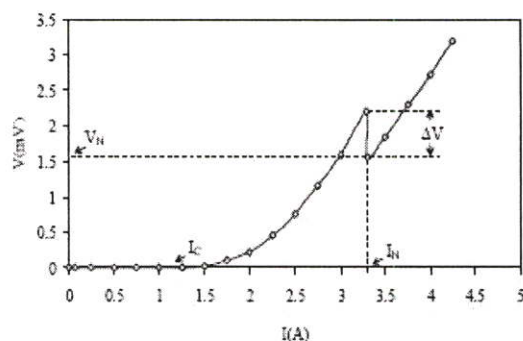


Figure 8. Illustration of current-voltage characteristics of sample with  $I_C = 1.05$  A

We will consider the effect of  $B_{EXT}$  on  $\Delta V$  as follows. In the case of the sample showing  $I_C=1.55A$ ,  $\Delta V$  was increased by  $B_{EXT}$  in the range of  $0 \sim 0.23$  mT, as shown in Fig. 5. This phenomenon can be explained by considering the macrostructure model as shown in Fig. 9 a). Since the cut-off region which has magnetic substance, was broadened by  $B_{EXT}$ ,  $\Delta V$  increases, that is, current path changes from the upper high resistance path to the lower low resistance path. When the external magnetic flux  $B_{EXT}$  exceeds 0.23 mT,  $\Delta V$  was decreased. Since  $B_{EXT}$  also destroys partially the lower superconduction part as shown in Fig. 9 a), the difference of electrical resistance between the upper path and the lower path became small. Then,  $\Delta V$  decreases. For sample  $I_C = 1.05$  A, when  $B_{EXT} = 0.2$  mT, the highest  $\Delta V$  is obtained. Consequently, the cut-off region, containing magnetic substance, is broadened until magnetic substance is uncovered completely.

In the case of sample showing  $I_C = 0.52$  A, when  $B_{EXT} = 0.16$  mT,  $\Delta V_{MAX}$  is obtained. Due to the cut-off region, which has magnetic substance, is broadened until magnetic substance is uncovered completely. Nevertheless,  $B_{EXT}$  will also destroy partially the lower part similarly as shown in Fig. 9c). Then,  $\Delta V_{MAX}$  in this case less than the sample with  $I_C = 1.05$  A as shown in Fig. 6.

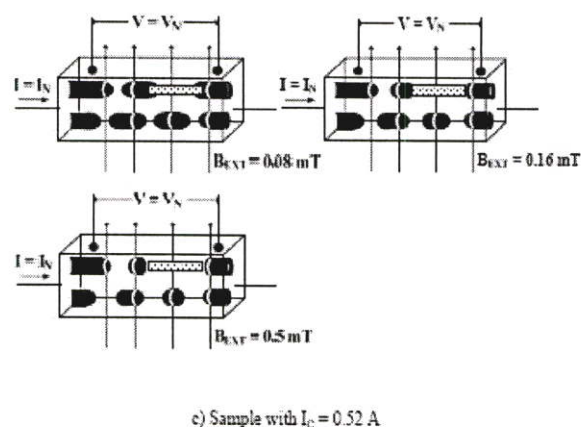
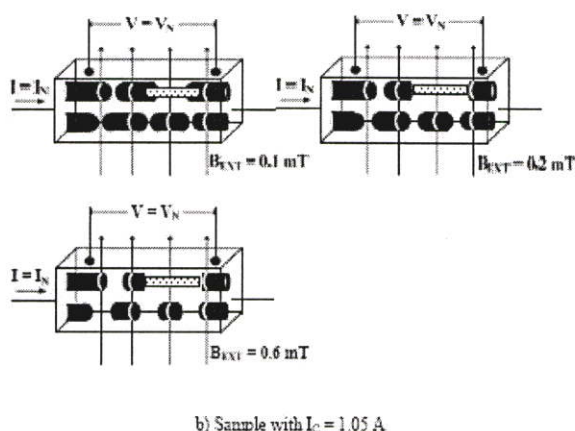
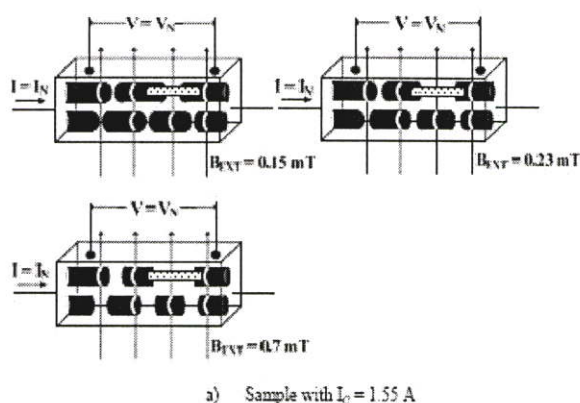


Figure 9. Illustration of a macrostructure model at various applied magnetic field

## V. CONCLUSIONS

From the investigation of Current and Voltage characteristics in  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconducting ceramic material, it's found that the negative resistance phenomenon is apparently found in range of low critical current. Moreover, the magnitude of differential voltage ( $\Delta V$ ) depends on external magnetic field and critical current. The largest differential voltage  $\Delta V_{MAX}$  is obtained by the employment of suitable  $B_{EXT}$ . Moreover, the occurrence of  $\Delta V_{MAX}$  in the high- $I_C$  sample must be applied  $B_{EXT}$  higher than the low- $I_C$  sample.

Some experimental results can be quite explained by the macrostructure model of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconducting ceramic materials.

## ACKNOWLEDGMENT

We are indebted to A. Keawcharoen and, C. Suriyaamarant for technical assistance

## REFERENCES

- [1] W. Wongsuttitum, W. Titiroonguang, "Macrostructure Model of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials," *Proc. Of Thailand's 24<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference*, (2001), pp. 992-997
- [2] W. Titiroonguang, Y. Akiba, S. Supadech, T. Kurosu and M. Iida, "Macrostructure Model of Y-Ba-Cu-O System," *Proceeding of Faculty of Engineering, Tokai University*, (1991) 17, pp. 7-13.
- [3] Y. Akiba, W. Titiroonguang, T. Kurosu, M. Iida and T. Nakamura, "Electromagnetic Memory Effect in Superconductivity Y-Ba-Cu-O System," *Qyo Bussuri* 58 No. 1 (1989) 151, [in Japanese]
- [4] W. Wongsuttitum, R. Piyananjatsri, W. Titiroonguang and M. Iida, "The Effect of The External Magnetic Field on Negative Resistance Phenomena of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  Superconducting Ceramic Materials," *KMITL SCIENCE JOURNAL*, Vol. 6, No.1, pp. 169-175, Jan-Apr 2006.

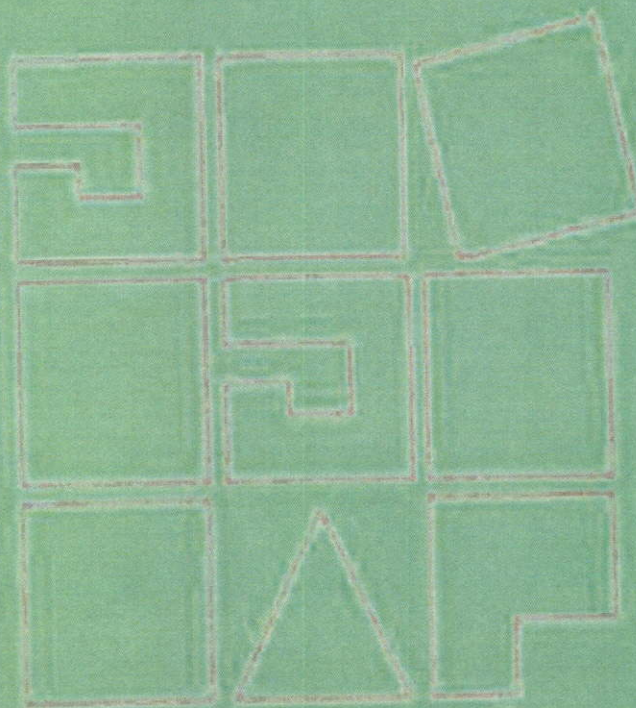
ISSN 0021-4922 (Print) / ISSN 1345-4922 (Online) / ISSN 1345-4922 (Print) / ISSN 1345-4922 (Online)

ISSN 0021-4922

# JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

*Part 1 Regular Papers, Brief Communications & Review Papers*

APRIL 2007 VOL. **46** NO. **4A**



Available online at <http://jjap.ipap.jp>

The Japan Society of Applied Physics  
Serial number 649

# JJAP

## Effect of Magnetic Memory on Negative Resistance Phenomenon in $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconducting Ceramic Materials

Wisut TITIROONGRUANG, Wisit WONGSUTTITUM\*, and Masamori IIDA<sup>1</sup>

*Electronics Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*  
<sup>1</sup>*Tokai University Junior College, Tokyo 108-8619, Japan*

(Received December 12, 2006; accepted January 8, 2007; published online April 5, 2007)

The magnetic memory effect in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  has been studied. By investigating the current–voltage characteristics, a voltage drop across the superconducting sample is observed on applying an external magnetic field. After the removal of the magnetic field, the voltage continues to decrease. This phenomenon is considered to be a nonvolatile memory effect. The voltage drop increases with applied magnetic flux, but it becomes constant at about 10 mT. The voltage drop is ascribed to the trapping of magnetic flux. While negative resistance occurs, the memorized state affects directly the magnitude of the differential voltage ( $\Delta V$ ), which is defined as the difference between threshold voltage and sustaining voltage. The mechanism of the memory effect and negative resistance can be sufficiently explained by the hypothesized macrostructure model of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic materials. [DOI: 10.1143/JJAP.46.1474]

KEYWORDS: negative resistance, macrostructure model

### 1. Introduction

When a current greater than the critical current passes through a type II superconductor in the mixed state, flux lines are driven into a viscous-flow state by increasing the Lorentz force  $J \times H$  to greater than pinning force, and a voltage is generated under this condition. The voltage increases with current. The slope,  $dV/dI$ , is the flux flow resistance of the superconductor in the mixed state arising from the viscous flow of the vortex. An increasing slope  $dV/dI$  as far as the line flux flow region is attained.<sup>1)</sup> We were interested in the report on the negative resistance phenomenon in the  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconductor.<sup>2)</sup> We found that an external magnetic field also affects the magnitude of differential voltage ( $\Delta V$ ) while negative resistance occurs. In the previously research of Titiroongruang *et al.*<sup>3)</sup> a macrostructure model of type II superconducting ceramic materials was introduced. We now discuss the development of a  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  model, which agrees with our experimental results.

### 2. Experimental Methods

In this experiment, we prepared  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting samples by the following conventional solid-state reaction,<sup>4)</sup>  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ , and  $\text{CuO}$  powders of 99.9% purity were ground, mixed together, and calcined at 930 °C for 20 h. After that, they were reground for 1 h. The powder was pressed into pellets of 10 mm diameter and 3 mm thickness under a pressure of 1t/cm<sup>2</sup>. The pellets were then sintered at 945 °C for 10 h, slowly cooled to 450 °C, maintained at this temperature for 24 h, and then cooled slowly. We experimentally investigated the effects of trapped magnetic flux on  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  bulk. The current–voltage characteristics were measured by the four-probe technique using indium electrodes at 77 K. The magnetic field was applied to the sample perpendicular to the direction of current flow, as shown in Fig. 1.

### 3. Results and Discussion

As shown in Fig. 2, curves (A) and (C) were taken at

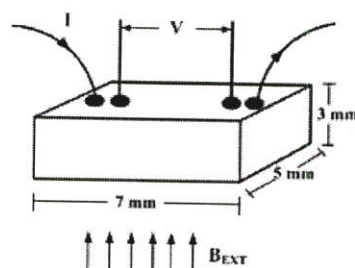


Fig. 1. Schematic representation of superconducting sample and direction of magnetic field.

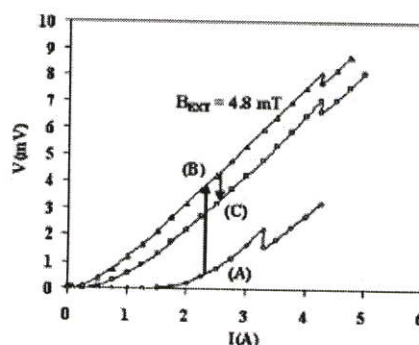


Fig. 2. Current–voltage characteristics, which show the magnetic memory.

$B = 0$  T, and curve (B) at  $B = 4.8$  mT at 77 K. Curve (B) gradually approaches curve (C) after the removal of the external magnetic field. If the voltage is applied again after returning to zero voltage, the current–voltage characteristic curve is the same as curve (C). This means that the sample is in the memory state. Thus, curve (C) corresponds to a memory state. In Fig. 3, the symbols  $V_{\text{MAG}}$  and  $V_{\text{MEM}}$  are the voltage drop across the sample under the external magnetic field and the memorized voltage of the sample after the removal of the external magnetic field, respectively.

\*E-mail address: sf064701@kmitl.ac.th

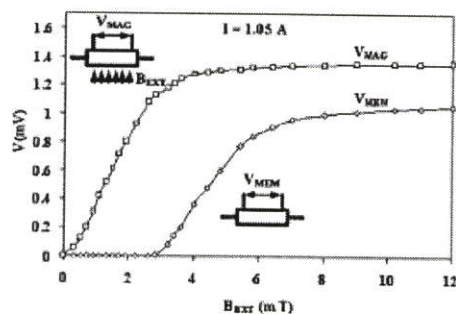
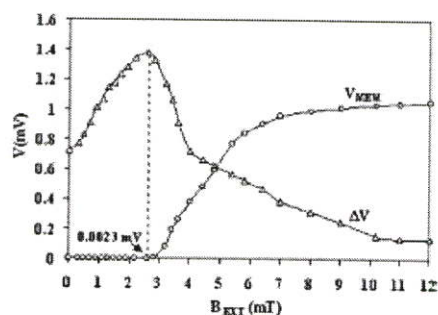


Fig. 3. Dependence of the voltage drop on external applied magnetic flux.

Fig. 4. Plot of  $V_{MEM}$ ,  $\Delta V$  vs  $B_{EXT}$ .

The curve of  $V_{MAG}$  versus  $B_{EXT}$  was obtained under an external magnetic field. The curve of  $V_{MEM}$  versus  $B_{EXT}$  was measured after the removal of the magnetic field. It was found that in the range of magnetic flux less than 1.6 mT, the voltage drop across the superconducting sample becomes zero after the removal of the magnetic field, that is, no memory effect is observed.

Figure 4 shows the effect of magnetic memory on  $\Delta V$ . Note that the curves of  $V_{MEM}$  and  $\Delta V$  versus  $B_{EXT}$  were measured after the removal of the external magnetic field. It was found that when the samples memorized a low magnetic field,  $\Delta V$  was increased. However, when  $V_{MEM}$  exceeded 0.0023 mV,  $\Delta V$  started to decrease.

Figure 5 shows the voltage drop  $V_{MEM}$  across the memorized sample and  $\Delta V$  versus  $B_{EXT}$  after the removal of the external magnetic field. The direction of the external applied magnetic flux is opposite to the direction of the magnetic flux trapped in the memorized sample. The memory is erased by an applied magnetic flux of less than 3.2 mT. On the other hand, the voltage drop increases again after the memory is erased, since the application of magnetic flux causes the memory effect in the range of magnetic flux greater than 3.2 mT.

Figure 6 shows the current-voltage characteristics of the sample memorized by applying an external magnetic field. The density of magnetic flux for the memory is 10 mT. The solid curve shows the case without applying an external magnetic field. When we applied a weak magnetic field in the direction opposite to the direction of the magnetic flux trapped in the memorized sample ( $B_{opp}$ ), the voltage drop increased. On the other hand, when the weak applied

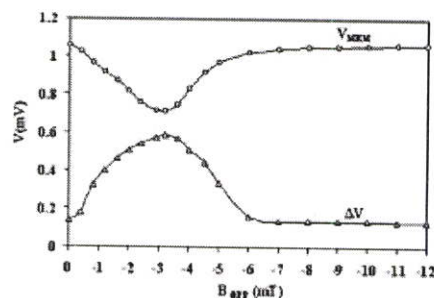
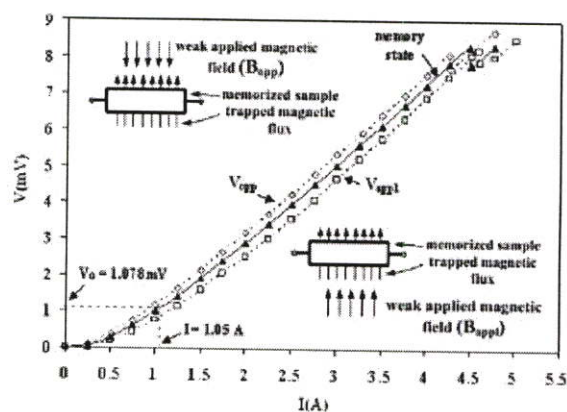
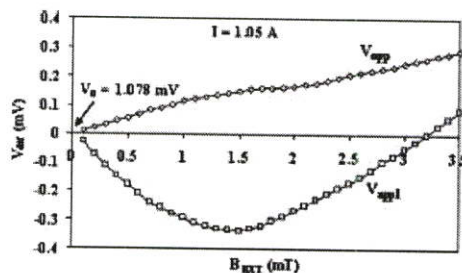
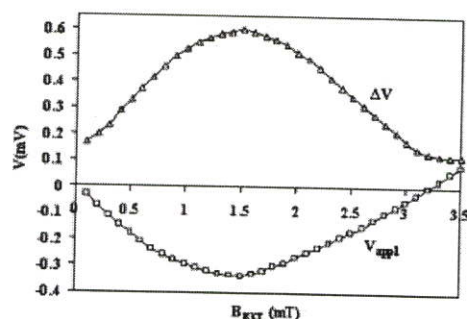
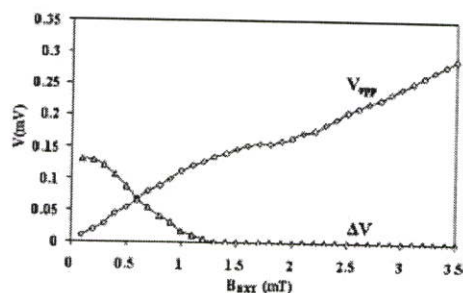
Fig. 5. Voltage drop  $V_{MEM}$  across the memorized sample and  $\Delta V$  vs  $B_{EXT}$  in direction opposite to trapped flux (after removal  $B_{EXT}$ ).

Fig. 6. Effect of weak external magnetic field on memorized sample.

Fig. 7. Change in the voltage drop across the sample memorized by  $B_{app}$  and  $B_{opp}$ .

magnetic field is in the same direction as the magnetic flux trapped ( $B_{app}$ ), the voltage drop decreases. Then, the voltage drop across the sample was measured as the magnetic field was varied, which is shown in Fig. 7. In the region of the magnetic field less than 3.2 mT, the effects of  $B_{app}$  and  $B_{opp}$  are opposite to each other. The voltage differences from the initial voltage  $V_0$  are denoted as  $V_{app}$  and  $V_{opp}$  for the magnetic fields  $B_{app}$  and  $B_{opp}$ , respectively. In this experiment,  $V_{app}$  and  $V_{opp}$  are measured at  $V_0 = 1.078$  mV.

The dependences of  $\Delta V$  and  $V_{app}$  on the external magnetic field  $B_{EXT}$  in the memorized sample are studied. The results are shown in Fig. 8. The maximum value of  $\Delta V$  and the minimum value of  $V_{app}$  simultaneously appear at

Fig. 8. Effect of  $B_{EXT}$  on  $\Delta V$  in the memorized sample.Fig. 9. Dependences of  $V_{app}$  and  $\Delta V$  on the external magnetic field  $B_{EXT}$  in the memorized sample.

$B_{EXT} = 1.5$  mT. In the case of  $B_{opp}$ , when  $V_{app}$  increases,  $\Delta V$  decreases, as shown in Fig. 9.

Figure 10 shows the hypothesized macrostructure model of  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ . The material discussed here is considered to be composed of two parts, that is, the superconduction part and the normal conduction part.<sup>5)</sup> This is shown in Fig. 10(a). In this figure, everywhere except for the black part represents the normal conduction part. It is assumed that the shape of the superconduction part is very complicated, thus, there are both wide and narrow parts. The narrow part corresponds to the weak link region. In other words, the narrow part is cut off first when the superconducting state is destroyed. The superconduction part has a magnetic substance which is ascribed to gadolinium. The simplified macrostructure model is shown in Fig. 10(b). The marks with a structure similar to that of  $\times$  in the superconduction part show defect regions where an appropriate value of magnetic flux can be trapped.

The current-voltage characteristic of the superconducting ceramic is shown in Fig. 11. This characteristic can be explained in terms of the macrostructure model, as follows.

From Fig. 12(a), when the applied current ( $I$ ) is equal to (or less than) its critical current ( $I_c$ ) value, the superconduction parts are connected at both sides of the sample. Then, the resistance of the sample does not appear. However, when  $I > I_c$ , the superconduction part is cut off because the weak point region is destroyed. The resistance appears under this condition. Since the amount in the upper destroyed part is less than that destroyed in the lower part, all the current flows in the upper part only. Then, the voltage

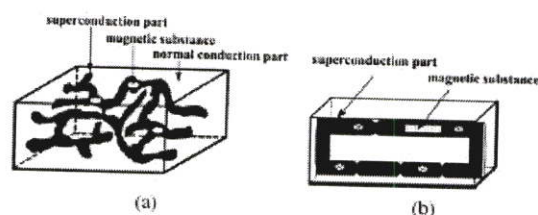
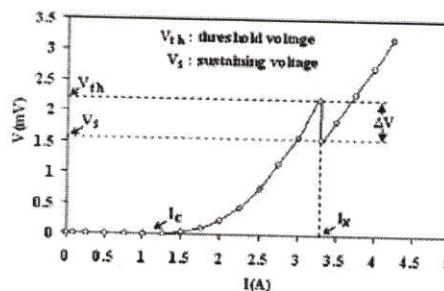
Fig. 10. Proposed model of the  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconducting ceramic material. (a) Macrostructure model. (b) Simplified model.

Fig. 11. Current-voltage characteristic.

drop occurs across the upper part until we apply a current of  $I_N$ . The upper superconduction part, which has a magnetic substance, is destroyed. Thus, the total cut off region of the upper part is larger than that of the lower part. The resistance of the upper part increases quickly. Then, all the current flows to the lower part, which has low resistance. Therefore, the voltage drop across the sample decreases immediately. This phenomenon is called negative resistance. The magnitude of the differential voltage is about 0.71 mV.

When we apply a low magnetic field, as shown in Fig. 12(b), the magnetic flux cannot penetrate the defect regions (represented by  $\times$ ). The memorized state does not occur.

In addition, when a sufficient external magnetic field is applied. For example, the magnetic flux of  $B_{EXT} = 2.6$  mT can penetrate through the defect regions, which induces a current (called the persistent current). This persistent current also causes a constant magnetic flux ( $B_{trap}$ ), which results in some regions of the superconduction part being continuously cut off, even though  $B_{EXT}$  has been removed. This causes the voltage drop across the sample ( $V = V_{MEM}$ ), which is different in magnitude from  $V_{MAG}$ . Usually, the value of  $V_{MAG}$  is larger than the value of  $V_{MEM}$ , because the magnitude of  $B_{EXT}$  is larger than that of  $B_{trap}$ . When the applied current reaches  $I_N$ , the superconduction part, which has a magnetic substance, is destroyed. At the same time,  $B_{trap}$  also destroys the superconduction part in this area. Then, the present  $\Delta V$  is more than the value obtained under the condition of no memorized state sample.

When magnetic flux ( $B_{EXT}$ ) is increased to 10 mT, as shown in Fig. 12(c), it can penetrate through all the defect regions, thus,  $B_{trap}$  increases. While negative resistance occurs, the cut off region, which has a magnetic substance is considerably broadened by  $B_{trap}$ . In addition,  $B_{trap}$  also destroys the lower part causing a decrease in  $\Delta V$ .

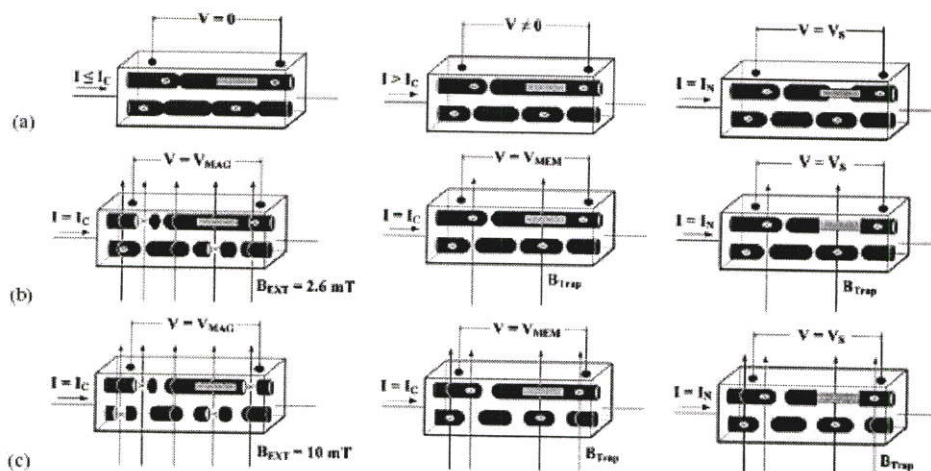


Fig. 12. Macrostructure model showing the voltage drop across the sample caused by an applied magnetic field.

#### 4. Conclusions

By investigating the current–voltage characteristics in  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic material, the negative resistance phenomenon is observed. To study of some the magnetic properties of this material, we applied an external magnetic field to the sample. When the magnetic field was removed, we found that voltage continued to decrease across the sample. This phenomenon is called magnetic memory. When the sample starts to memorize a magnetic field by the application of an external magnetic field, a high different voltage is obtained, which subsequently gradually decreases while magnetic memorization increases. When we reversed the magnetic pole, magnetic memorization decreased and a different voltage increased. On the other hand, a different voltage decreased, when  $V_{\text{MEM}}$  increased. Some of the experimental results can be partially

explained by the macrostructure model of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  superconducting ceramic materials.

#### Acknowledgements

We are indebted to L. Supadee at Western Digital (Bangpa-in) and C. Suriyaamaranont for technical assistance.

- 1) Y. B. Kim, C. F. Hempstead, and A. R. Studer: *Phys. Rev.* **139** (1965) A1163.
- 2) W. Wongsuttitum and W. Titiroongruang: *Proc. Thailand 24th Electrical Engineering Conf.*, 2001, p. 992.
- 3) W. Titiroongruang, Y. Akiba, S. Supadech, T. Kurosu, and M. Iida: *Proc. Faculty of Engineering, Tokai University*, 1991, p. 7.
- 4) P. Boonrengsap, S. Panakasem, D. Yossakri, and W. Titiroongruang: *Proc. Thailand 37th Kasetsart University Annual Conf.*, 1999, p. 378.
- 5) Y. Akiba, W. Titiroongruang, T. Kurosu, M. Iida, and T. Nakamura: *Oyo Buturi* **58** (1989) 151 [in Japanese].

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

วิสิฎฐ์ วงศ์สุทธิธรรม

วันเดือนปีเกิด

วันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2517

สถานที่เกิด

จังหวัดจันทบุรี

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สถานที่สำเร็จการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2541

วุฒิการศึกษาระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สถานที่สำเร็จการศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีที่สำเร็จการศึกษา

ปีการศึกษา 2545