

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ
ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

Effect of Magnetic Field on Negative Resistance Phenomena of Gd-Ba-Cu-O
Superconducting Ceramic Materials



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **61998**
วัน,เดือน,ปี **25** ก.ค. 2549

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ
ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก
Effect of Magnetic Field on Negative Resistance Phenomena of Gd-Ba-Cu-O
Superconducting Ceramic Materials



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ

ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซอร์รามิก

ผู้จัดทำ

นาย พงศ์สันต์ นุ่นสุข

รหัส 45015241

นาย สุเมธ เพ็ชรทอง

รหัส 45015302



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ
ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

นักศึกษา

นาย พงศ์สันต์ นุ่นสุข รหัส 45015241

นาย สุเมธ เพ็ชรทอง รหัส 45015302

สาขาวิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา

2547

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

จากการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน พบว่ามีปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบเกิดขึ้น ซึ่งค่ากระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ จะมีค่าลดลง เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารและส่งผลทำให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ มีการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองยังพบอีกว่าตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบสามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าที่ค่าสนามแม่เหล็ก 60 a.u. ซึ่งเป็นค่าที่ชิ้นสารเริ่มเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก สามารถควบคุมให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Magnetic Field on Negative Resistance Phenomena of Gd-Ba-Cu-O Superconducting Ceramic Materials
Student	Mr. Phongsan Nunsuk Student ID 45015241 Mr. Sumate Pettong Student ID 45015302
Programme	Electrical Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT


In the study , relationship between current and voltage of Gd-Ba-Cu-O superconductor ceramic materials was measured at 77K. It was found that negative resistance phenomena were occurred. The critical current and voltage during the negative resistance phenomena there was value decrease when magnetic field was taken into account as an extraneous to the superconductor sample and effect on current position during occurrence of negative resistance that charged. In the experiment it was found that the position of current which negative resistance had occurred could be controlled to have a static value by giving superconductor material an external magnetic field at 60 a.u. which was a value made superconductor material become memory state would make the position of current which negative resistance occurred had a static value.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง ในการให้คำปรึกษาแนะนำ แนวทางแก้ไขปัญหาและให้การสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณคุณคุณวิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือแนะนำลำดับขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์นี้ ทั้งคอยดูแลเอาใจใส่มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้ในด้านต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา




(นาย พงศ์สันต์ นุ่นสุข)


(นาย สู่เมธ เพ็ชรทอง)
คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและสิ่งอื่นอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสารที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงกันอย่างแพร่หลาย อย่างเช่นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้มีการศึกษาถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่นๆ ที่มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ทำการวิจัยก็คือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งมีเนื้อสารเป็นเซรามิก จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ ทำให้เราค้นพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจ ก็คือ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ซึ่งตามปกติแล้วจะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น ในปริภูมิพหุขั้วฉบับนี้จึงได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O และค่าของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อปริมาณกระแสวิกฤต และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
คำนำ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญรูป.....	VII
ศัพท์เทคนิค.....	IX
สัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ.....	3
1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c).....	3
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c).....	3
1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c).....	3
1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	4
1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect).....	4
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance).....	6
1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect).....	7
1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	7
1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก.....	7
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2	8
1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance).....	10
1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ.....	10
1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance).....	11
1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance).....	11
1.7 ขอบเขตงานวิจัย.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	13
2.1 บทนำ.....	13
2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.....	13
2.2.1 ปปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect).....	13
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน.....	14
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....	17
3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	17
3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	17
3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา.....	18
3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	20
3.2.1 ขั้นตอนและผลการทดลอง ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	21
3.2.2 ขั้นตอนและผลการทดลอง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการควบคุม ตำแหน่งกระแสการเกิดความต้านทานเชิงลบให้คงที่.....	25
3.2.3 ขั้นตอนและผลการทดลอง การจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	30
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	35
ภาคผนวก.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes.....	2
1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส.....	4
1.3 ปრაกฏการณ์ไมส์เนอร์.....	6
1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	6
1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	7
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 และ ข) ประเภทที่ 2.....	9
1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ และ ข) ชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ.....	10
1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR).....	11
1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR).....	12
2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก และ ข) การดูดแม่เหล็ก.....	14
2.2 ขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	15
2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	15
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	15
3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O.....	19
3.2 ขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง.....	20
3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	20
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	21
3.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ.....	22
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ก) ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กจาก ภายนอกกระทำ และ ข) ขณะที่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำ.....	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับปริมาณสนามแม่เหล็ก.....	24
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขนาดการเปลี่ยนแปลง แรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ.....	24
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบกับ ปริมาณสนามแม่เหล็ก.....	25
3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า.....	26
3.11 แสดงตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ.....	26
3.12 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าแต่ละครั้ง กับตำแหน่งการเกิดความต้านทานเชิงลบ.....	30
3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร(V) กับสนามแม่เหล็กภายนอก.....	31



ศัพท์เทคนิค

กระแส	Current
แกดโกลินียมออกไซด์	Gadolinium Oxide
เกาส์	Gauss
ความเข้มซบได้ทางแม่เหล็ก	Magnetization
ความเข้มซบได้ในทางสุญญากาศ	Permeability of free space
ความเข้มซบได้สัมพัทธ์	Relative Permeability
ความต้านทาน	Resistance
ความต้านทานเชิงลบ	Negative Resistance
ความหนาแน่นกระแสวิกฤต	Critical Current Density
ค่าวิกฤต	Critical Values
คอปเปอร์ออกไซด์	Copper Oxide
เครื่องบันทึกสองแกน	X-Y Recorder
เซรามิก	Ceramic
เซลเซียส	Celcius
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์ซีลส์บี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	Meissner Effect
ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	Zero Resistance
แม่เหล็กเฟอร์โร	Ferromagnetic
แม่เหล็กไดอา	Diamagnetic
แรงดันไฟฟ้า	Voltage
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Field
สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	Magnetic Susceptibility
สารแม่เหล็ก	Magnetic Substance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก	wbm^{-2}
B_u	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	wbm^{-2}
H	ความเข้มสนามแม่เหล็ก	Am^{-1}
H_c	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Am^{-1}
H_{c1}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Am^{-1}
H_{c2}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Am^{-1}
I	กระแส	A
I_c	กระแสวิกฤต	A
J_c	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Acm^{-1}
M	สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก	Am^{-1}
R	ความต้านทาน	Ω
T_c	อุณหภูมิวิกฤต	K
χ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
μ_0	ความซึมซับได้ในสุญญากาศ	Hm^{-1}
μ_r	ความซึมซับได้สัมพัทธ์	-
ΔV	ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

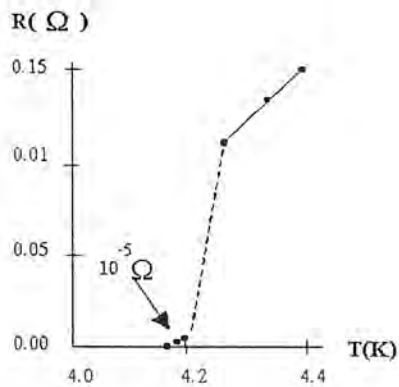
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายในเป็นศูนย์ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้โดยสะดวก จึงไม่เกิดความต่างศักย์และไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ดังที่ได้เกิดขึ้นในโลหะตัวนำทั่วไป จึงทำให้มีการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์และช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาสร้างเป็นสายเคเบิลแทนโลหะ การใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนแท่งแม่เหล็กถาวร และใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จึงช่วยให้อุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงและไม่มีการสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปกติในโลหะตัวนำโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้น ซึ่งนักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป นาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลวโดยใช้ปรอทเป็นวัสดุในการทดลอง

ปี ค.ศ. 1911 [1] นาย Heike Kamerlingh ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมากๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิต่ำที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)

นอกจากนี้นาย Onnes ยังพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะชนิดอื่นๆ รวมทั้งโลหะผสมอีกหลายชนิด ทำให้นาย Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1913



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นก็มึ้นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเชียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ได้ทำการทดลองกับธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแก่วงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากความสามารถที่จะใช้ใน ไตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งในไตรเจนเหลวนี้อุปกรณ์ราคาถูกลงและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีความสูงของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{3}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [1] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่น ชิ้นสารที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95$ K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

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

1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

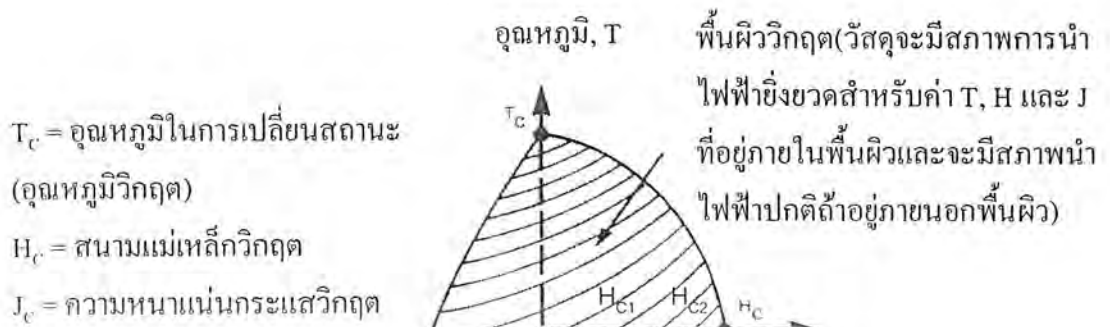
เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น H_{c1} ค่า J_c จะมีขนาดลดลงเป็น J_{c1} และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น H_{c2} ค่า J_c ก็จะลดลงเหลือ J_{c2} ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง นั่นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

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

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

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

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

χ_m คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

μ_0 คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

μ_r คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

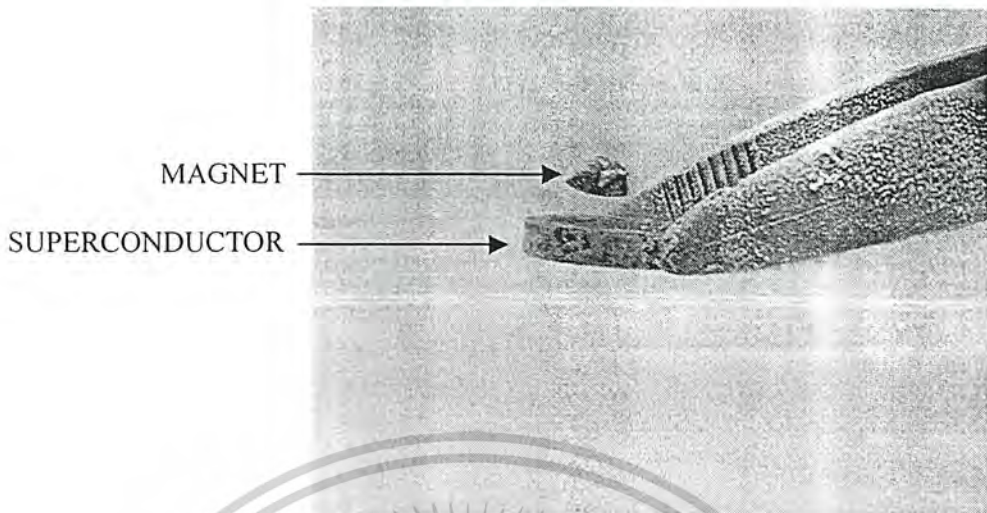
เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

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

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

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

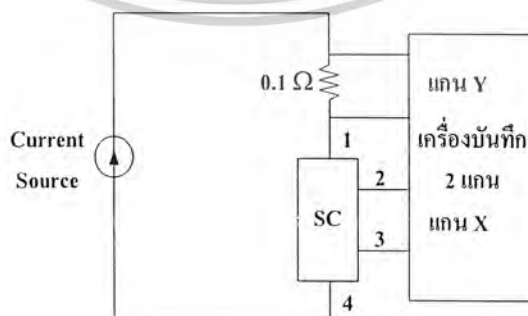
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

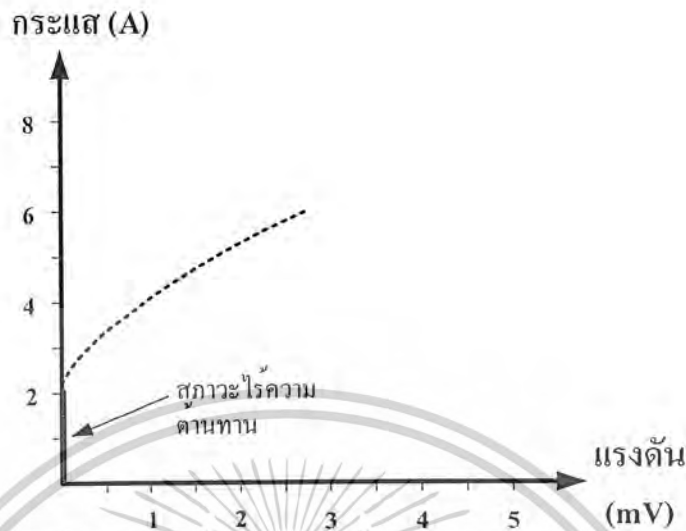
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชิ้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสาร ได้ถูกแช่อยู่ภายในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน y นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปราคฏุกาณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปราคฏุกาณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นสารเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

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

เมื่อ	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a = 0$	เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_c > H_a > 0$	เป็นสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด
	$T < T_c$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a > H_c$	เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าในขณะที่ $T = T_c$ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ($T = T_c$ ได้ $H_c = 0$) แต่ถ้า $T \ll T_c$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามากๆ จึงจะทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

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

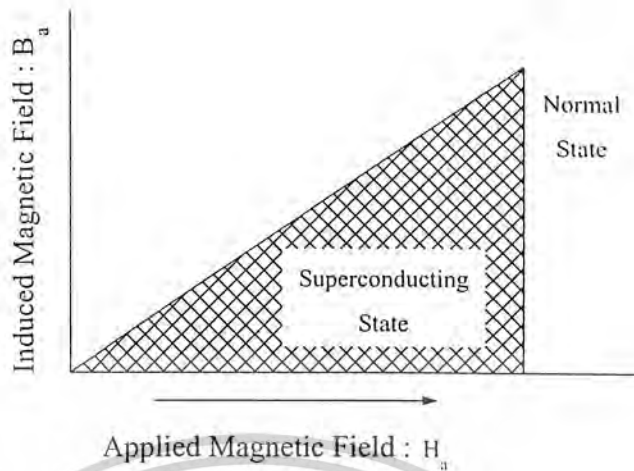
เมื่อ $H_C(T) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤต

$H_C(0) =$ สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

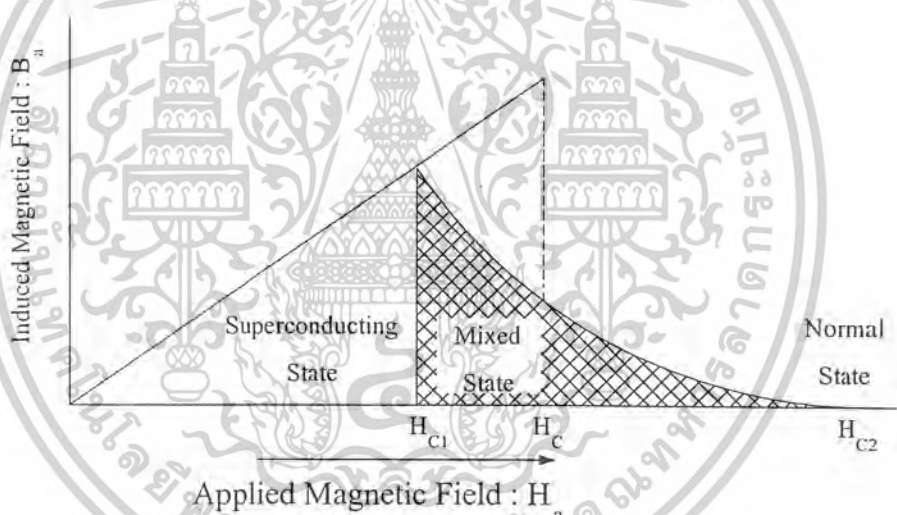
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 [3]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{M} = -\vec{H}_0$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอะที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$, $HgBa_2CuO_4$ 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

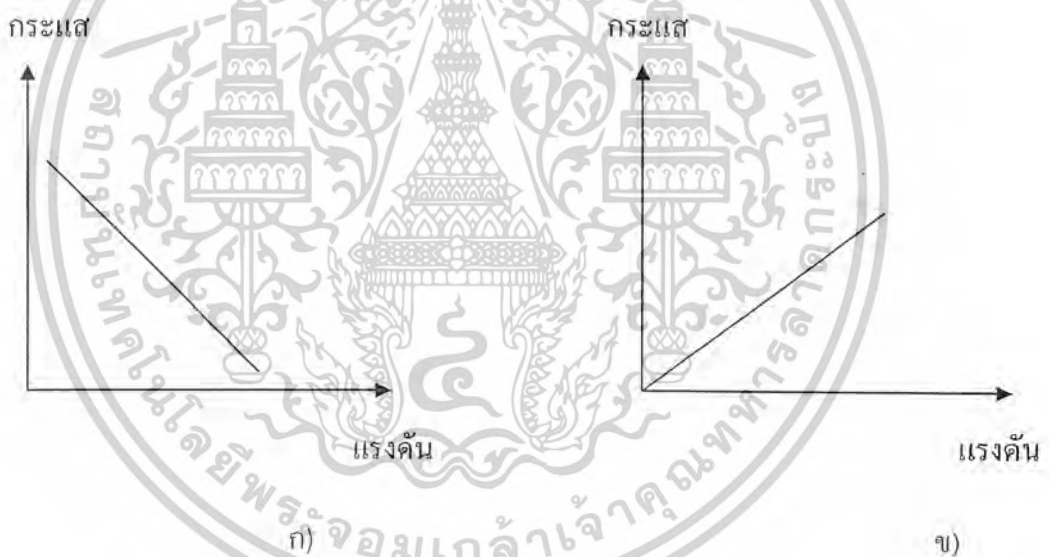
พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (H_a) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization (M) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้
 ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้ จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{c1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{c2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ
ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

ความต้านทานเชิงลบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

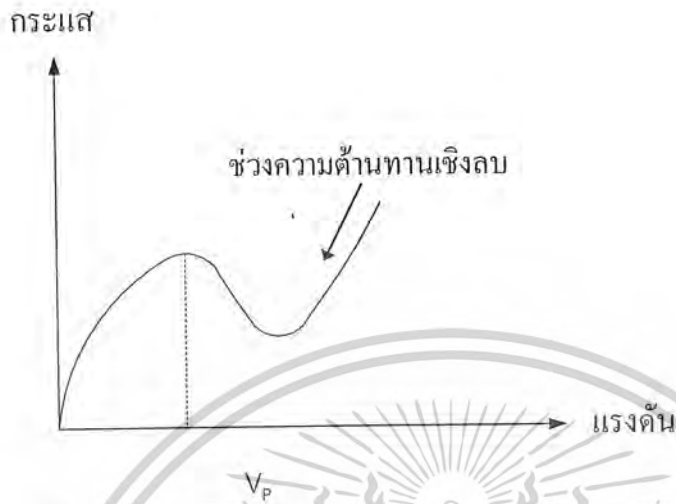
ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรตัว S ดังรูปที่ 1.8 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้ สามารถเกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤต I_{th} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current controlled negative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



รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)

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



รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

1.7 ขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 4 บท เค้าโครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ที่เกิดขึ้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลอง เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการควบคุมตำแหน่งกระแสการเกิดความต้านทานเชิงลบให้คงที่ รวมไปถึง การจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O (ในอัตราส่วน 1 : 2 : 3)

บทที่ 4 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

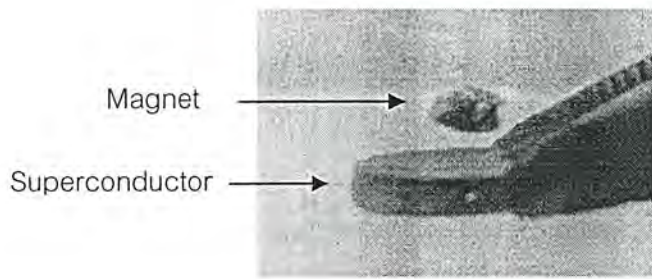
ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor : LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor : HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O) และ $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd-Ba-Cu-O) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

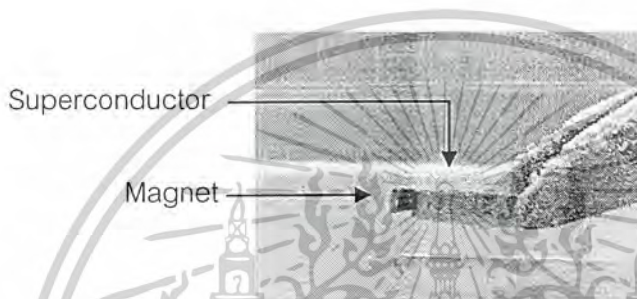
เป็นการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีดังนี้

2.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเม็ดยานว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเม็ดยานที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) ถ้าเม็ดยานมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดยานจากการทดสอบพบว่า



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

เม็ดสารมีการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current) ดังรูปที่ 2.1 ก) และที่น่าสนใจก็คือ บริเวณขอบของเม็ดสารบางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ข) การที่บางส่วนของเม็ดสารมีการดูดแม่เหล็ก น่าจะมีสาเหตุมาจากสารแกลโคลิเนียมที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก [4]

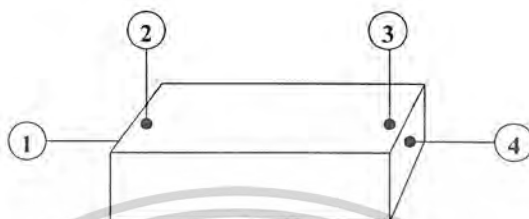
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของ

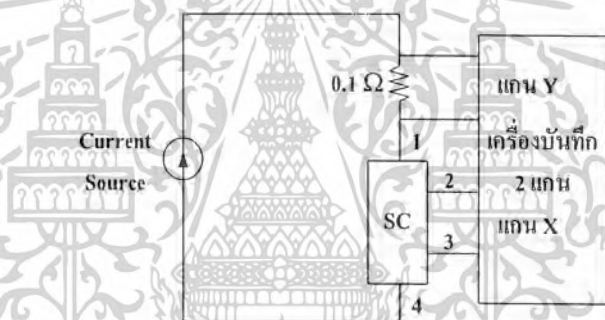
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 2.2

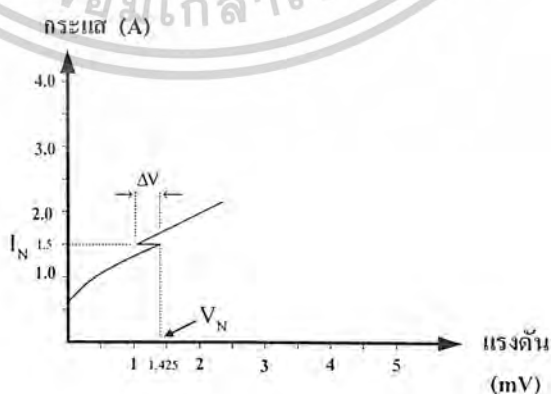


รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

3.1 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด Gd-Ba-Cu-O [5-7]

3.1.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

ในการเตรียมสารเพื่อใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วยธาตุหลักๆ ดังนี้ แกลโคลิเนียม แบริยม และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบดังนี้ แกลโคลิเนียม ออกไซด์ (Gd₂O₃) แบริยมคาร์บอเนต (BaCO₃) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.9% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันในอัตราส่วนโดยอะตอม Gd : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งอัตราส่วนนี้ได้มีการวิจัยมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้งสาม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



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

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

$$\text{Gd}_2\text{O}_3 = (2 \times 157.26) + (3 \times 15.99) = 362.49 \text{ กรัมต่อ โมล}$$

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

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

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Gd₂O₃ 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 362.49 กรัม

 ถ้า ½ โมล ต้องเตรียมสาร = 181.245 กรัม

2) BaCO₃ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งหมายความว่า จะได้สาร $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} = 814.576$ กรัม

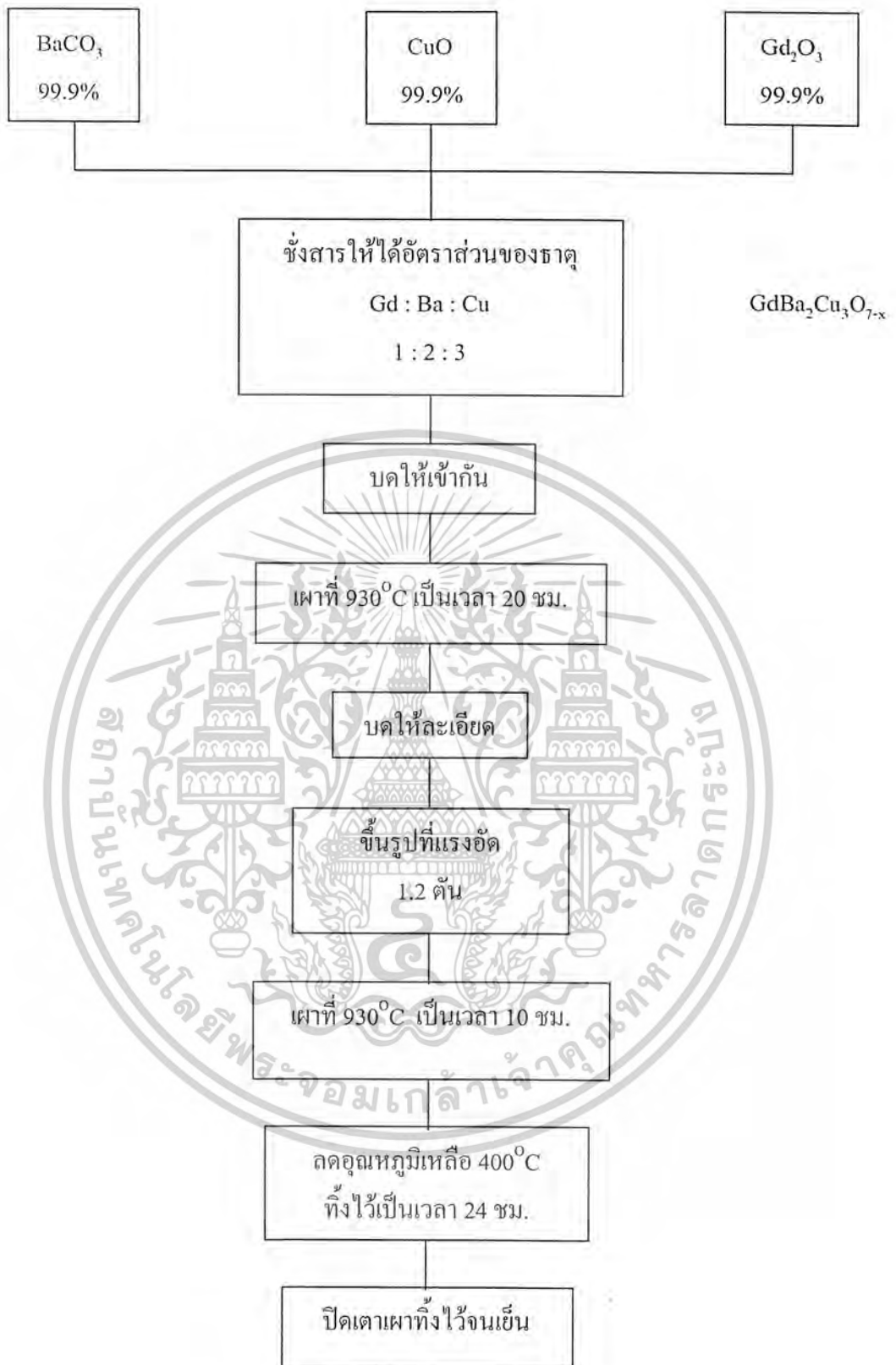
จากสารตั้งต้นทั้งหมด 814.576 กรัม ถ้าต้องการ $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้แคลโคลิเนียมออกไซด์ 2.225 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 4.845 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 2.929 กรัม

3.1.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

ในขั้นตอนกระบวนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะกล่าวถึงนั้นเป็นกระบวนการเผามาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีกระบวนการเผาดังนี้

1. ชั่งสารประกอบ Gd_2O_3 , BaCO_3 และ CuO โดยใช้อัตราส่วน $\text{Gd} : \text{Ba} : \text{Cu}$ เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930°C ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้จากการเผาแยกส่วนที่เป็นสีเขียวทิ้งไป จากนั้นนำส่วนที่เป็นสีดำนมาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1.2 ตันให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 930°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400°C อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซอร์รามิก

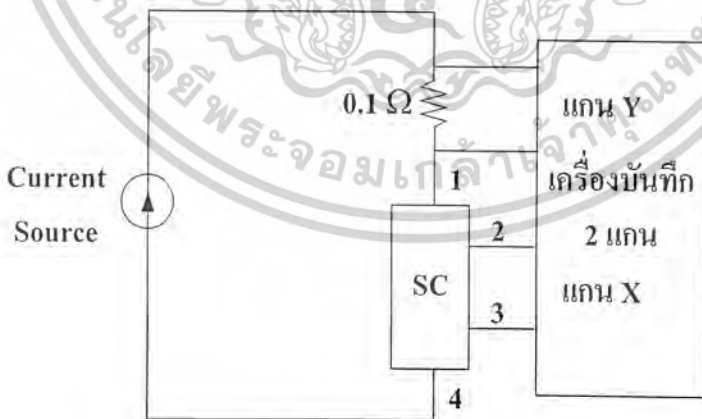
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.2

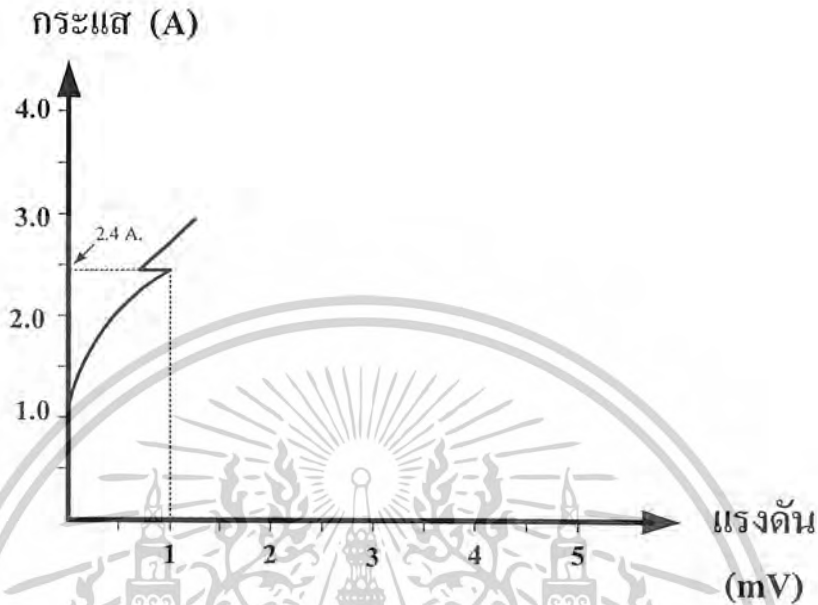
รูปที่ 3.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

3.2.1 ขั้นตอนและผลการทดลอง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

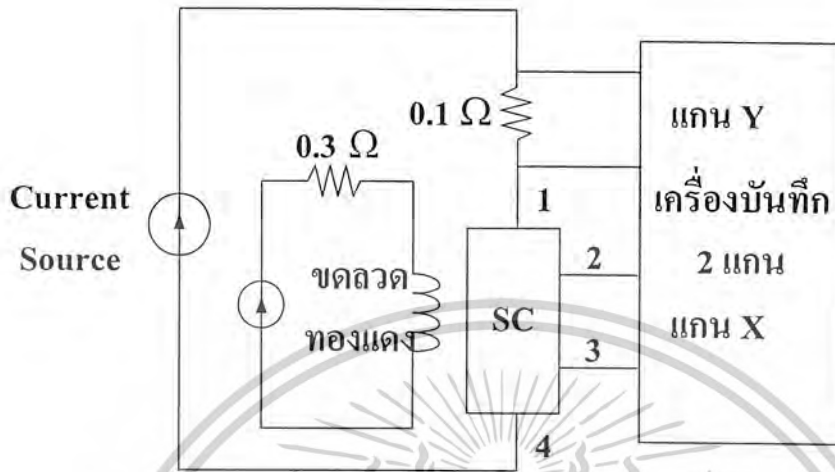
ในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O มีขั้นตอนดังนี้

1) นำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านแรงอัด 1.2 ตัน ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส มาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 3.5 เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ในไนโตรเจนเหลวในขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย ($B=0$ a.u.) บันทึกผลการทดลอง

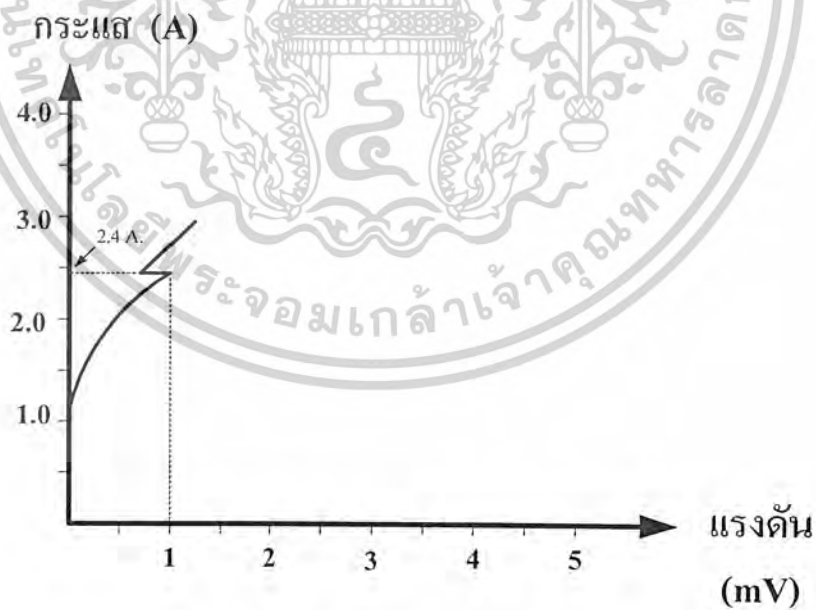
2) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเริ่มต้นที่ 10 a.u. ($B=10$ a.u.) แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กขึ้นเรื่อยๆ โดยเพิ่มจนถึง 100 a.u. ($B=100$ a.u.) ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับชิ้นสารนั้นได้มาจากการป้อนกระแสไฟตรงไหลผ่านขดลวด ($B=1$ a.u. คือ การป้อนกระแสไฟตรงผ่านขดลวดตัวนำเป็นปริมาณ 1 mA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองข้างต้นทั้งสองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.6 ก)-ข)

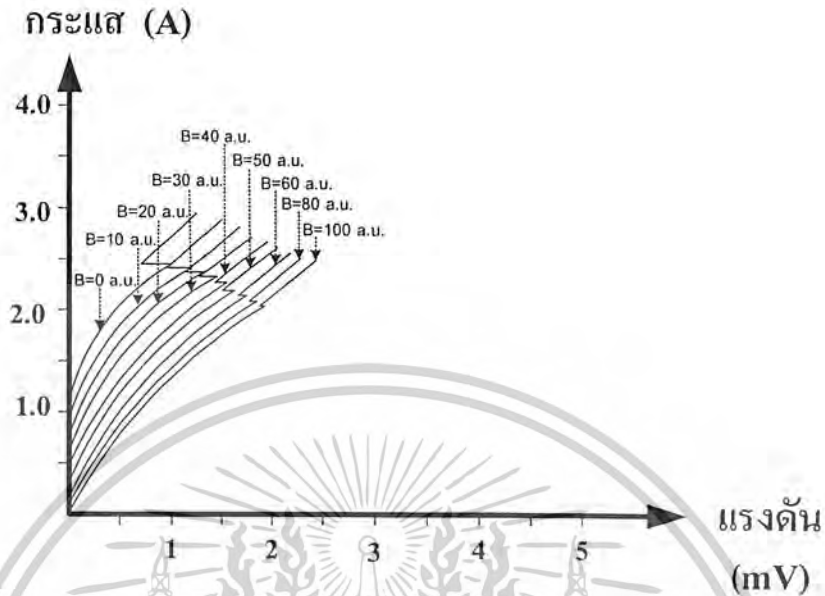


รูปที่ 3.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ



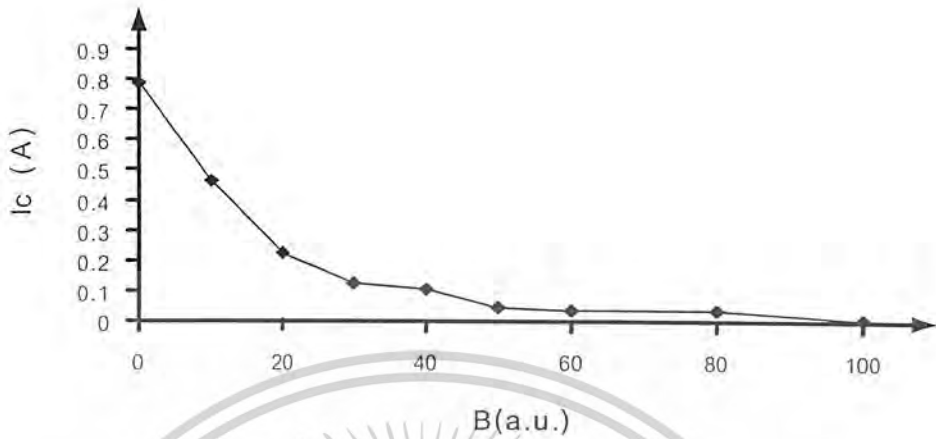
ก) ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

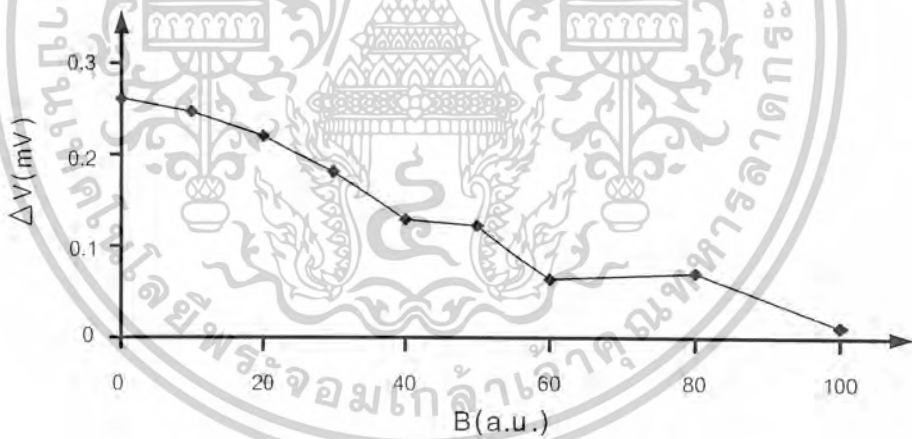


รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ก) ขณะที่ยังมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำ
ข) ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกกระทำ

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้กระแสสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีค่าลดลงและส่งผลทำให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสวิกฤต ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบและตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบเทียบกับสนามแม่เหล็กภายนอก ได้ดังรูปที่ 3.7 , 3.8 และ 3.9

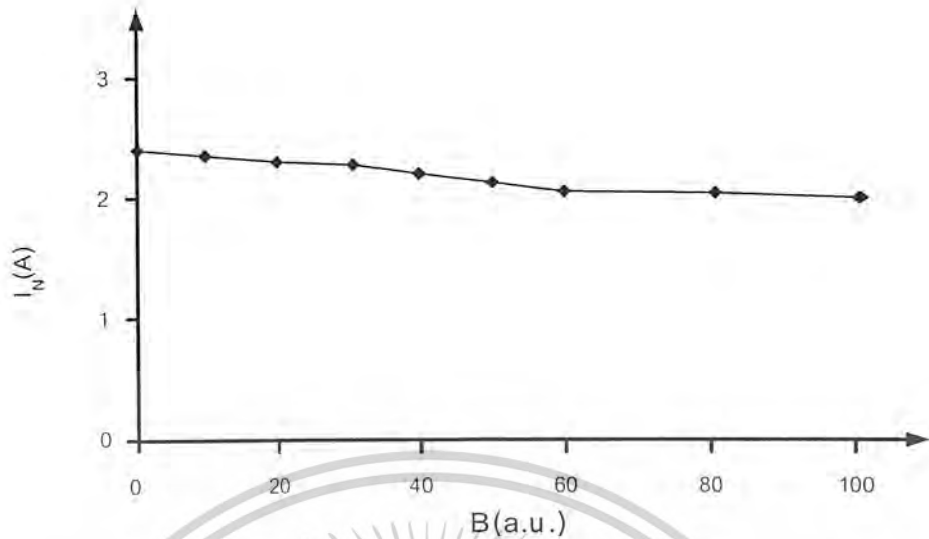


รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดกับปริมาณสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบกับปริมาณสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



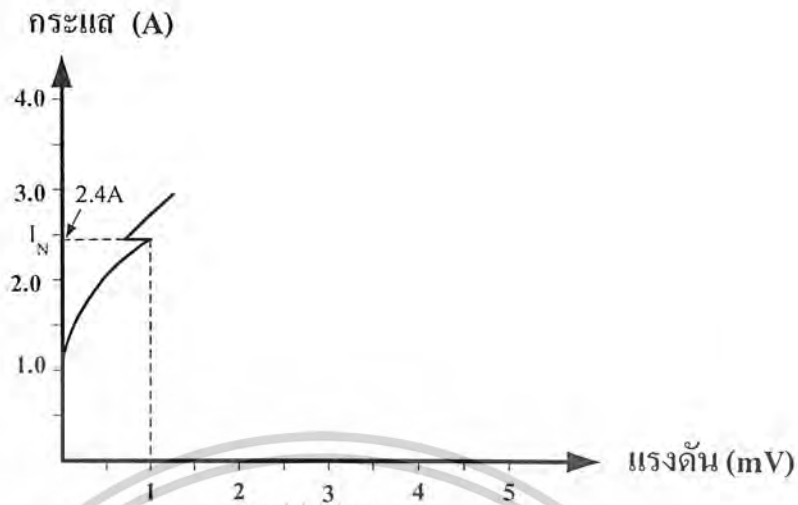
รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบกับปริมาณสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อกระแสวิกฤต คือเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารมากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามแม่เหล็กเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเสียสภาพง่ายขึ้น ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ คือเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารมากขึ้นจะทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบน้อยลงและผลการทดลองในรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ คือเมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารมากขึ้นจะทำให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีการเปลี่ยนแปลง

3.2.2 ขั้นตอนและผลการทดลอง ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการควบคุมตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบให้คงที่

ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อดูความเสถียรของตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (I_N) ซึ่งเราจะพิจารณาเป็นตำแหน่งของกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก ในการทดลองชิ้นสารจะอยู่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (93 เคลวิน) พบว่าในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละครั้ง ตำแหน่งที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

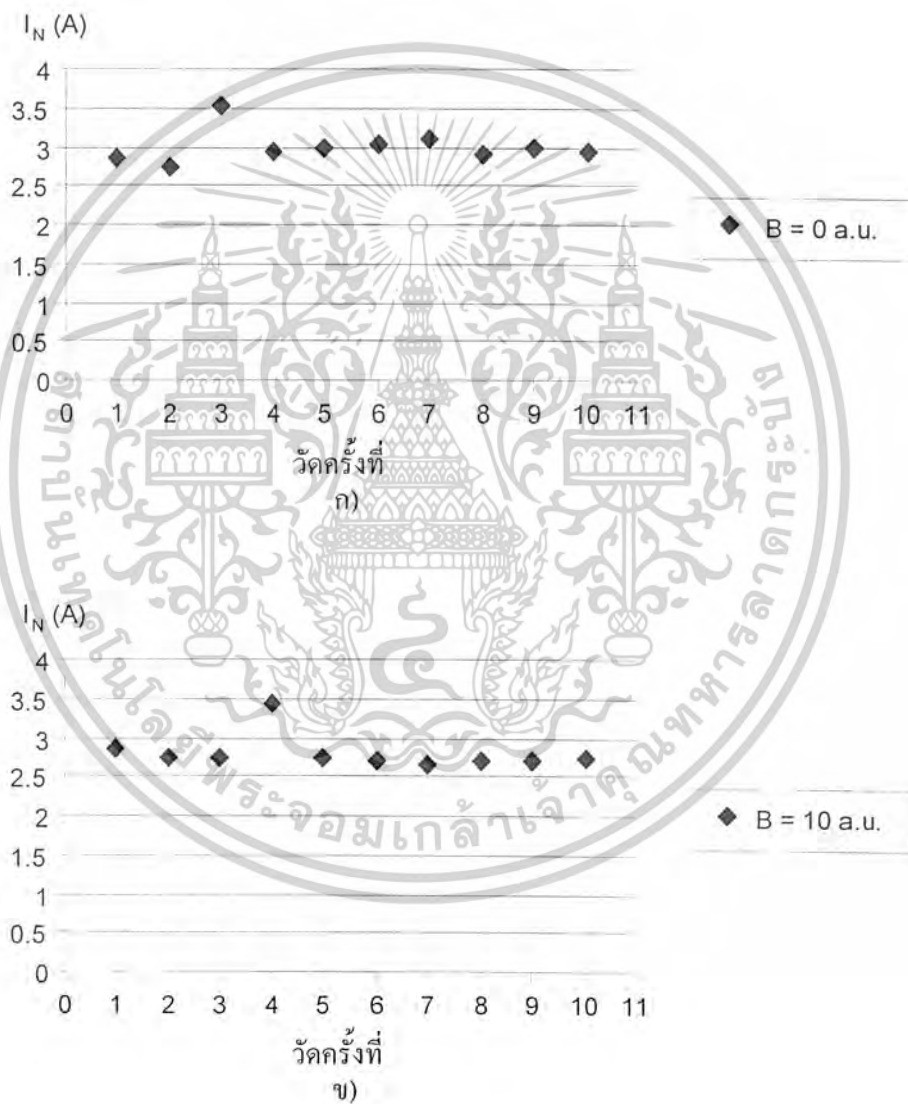
ต่อไปจะเป็นการทดลองเพื่อดูว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (I_N) อย่างไร วงจรที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 3.5

ในการทดลองมีขั้นตอนดังนี้

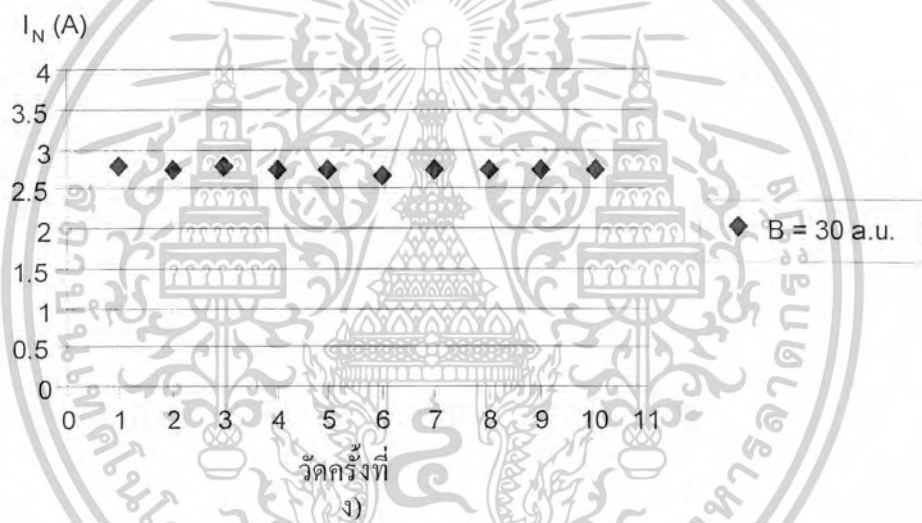
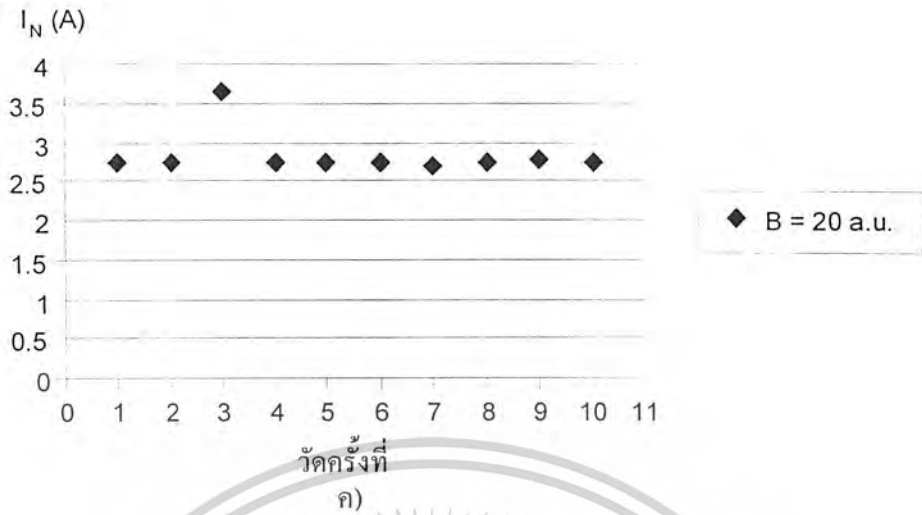
1) นำขั้วสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขดมมาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 3.5 เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ในไนโตรเจนเหลวในขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย ($B = 0$ a.u.) โดยทำการวัดทั้งหมด 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

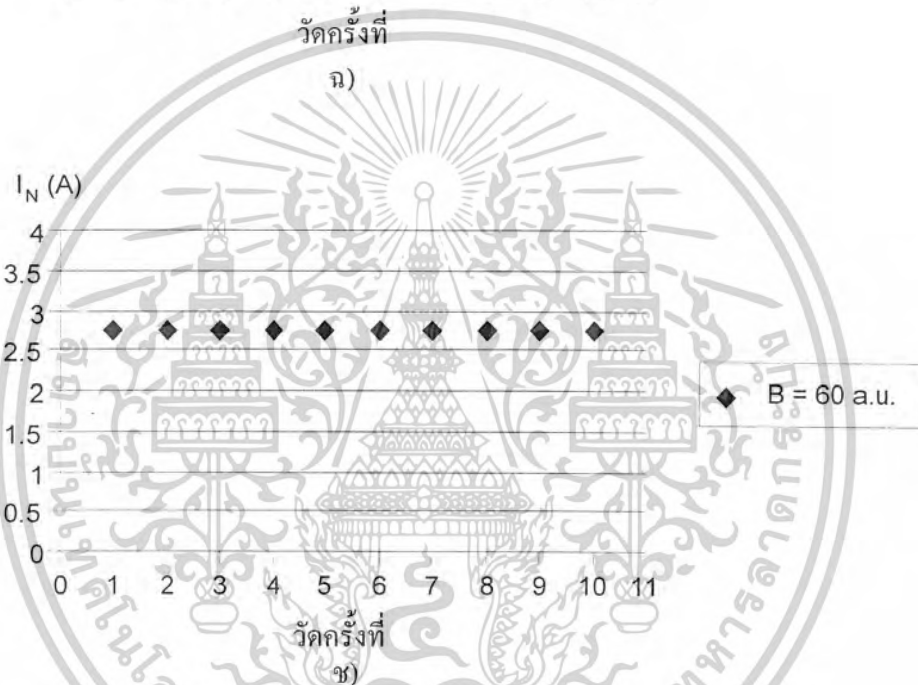
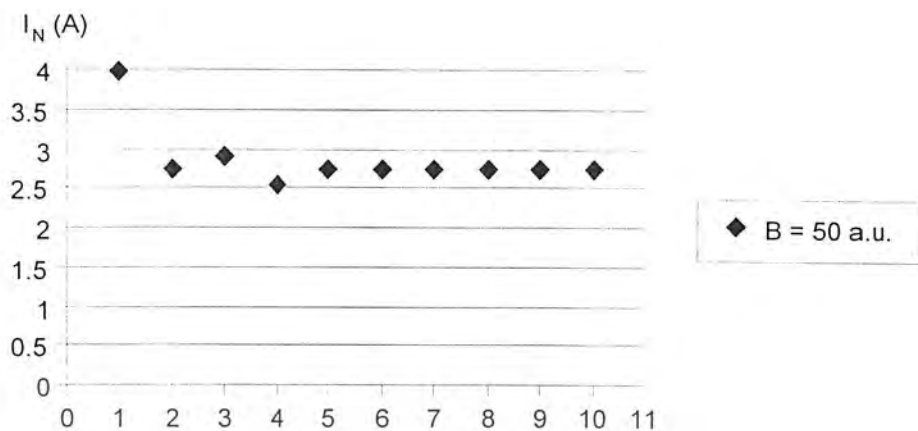
2) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเริ่มต้นที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, และ 100 a.u. (1 a.u. เทียบได้กับการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด 1 mA) แก่ จินัสตาร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้า จำนวน 10 ครั้ง บันทึกผลการทดลอง



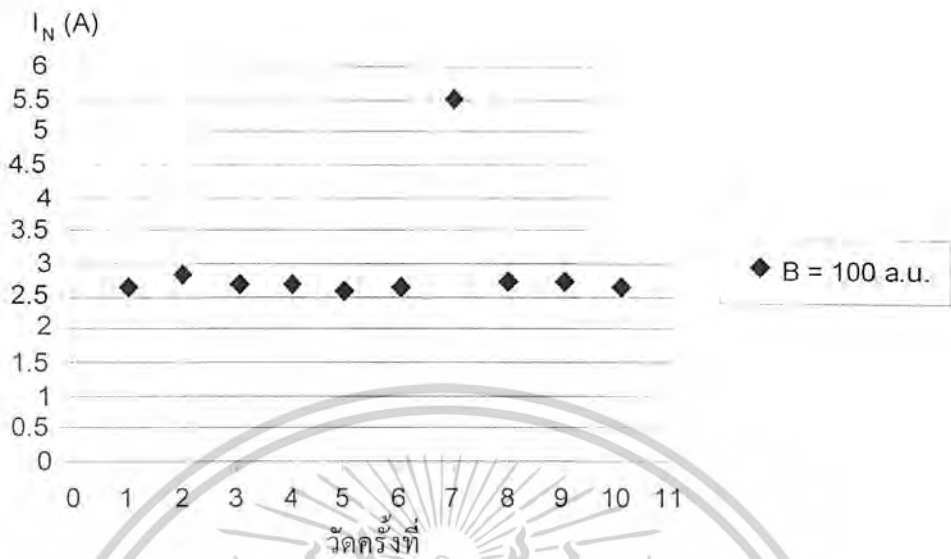
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าแต่ละครั้งกับตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

จากกราฟในรูปที่ 3.12 พบว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่อิออนในขณะวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าพบว่า ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ (I_N) ในการวัดจำนวน 10 ครั้ง มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ให้สนามแม่เหล็ก และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้นตำแหน่งการเกิดความต้านทานเชิงลบเริ่มคงที่มากขึ้น ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบจะคงที่ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเท่ากับ 60 a.u. แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กมากกว่า 60 a.u. ตำแหน่งกระแส (I_N) จะไม่คงที่

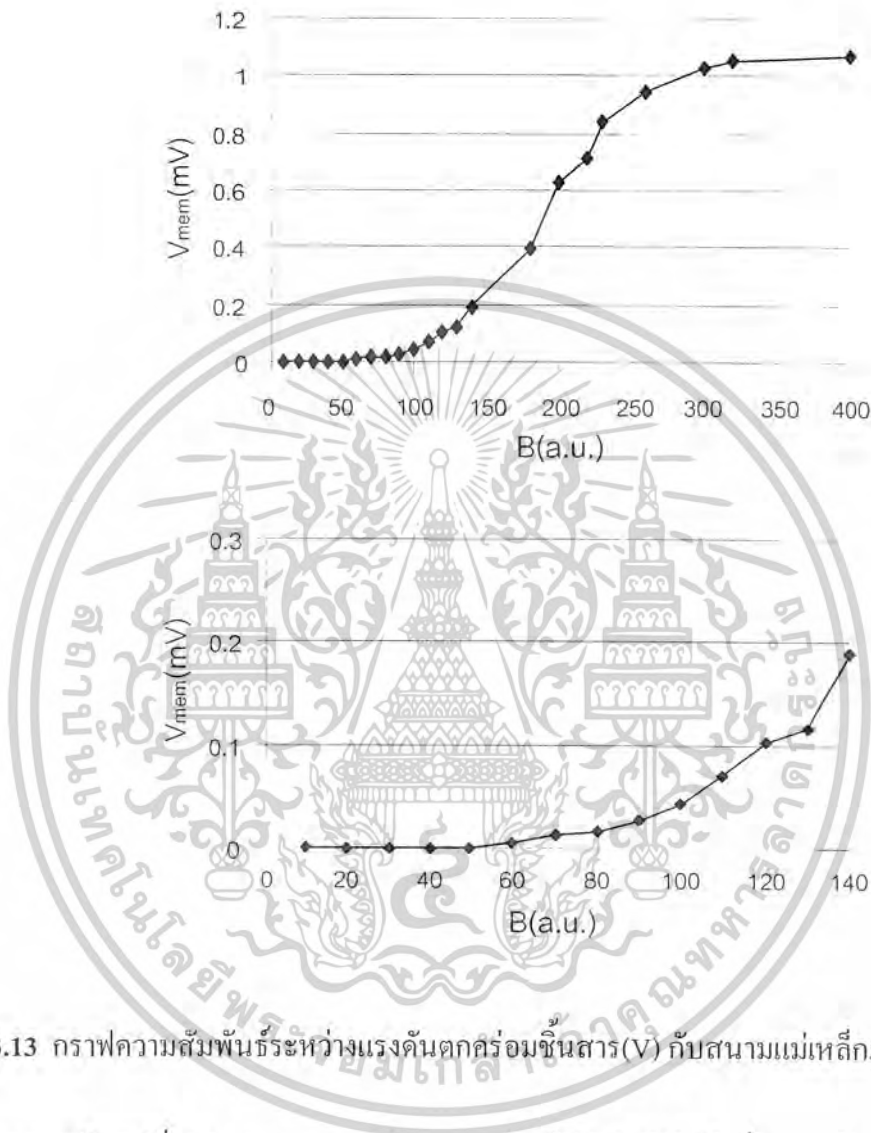
3.2.3 ขั้นตอนและผลการทดลอง การจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

สภาวะการจำแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงๆ แก่อิออน เมื่อเกิดการจำแม่เหล็กขึ้น จะทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างอยู่ในชั้นสาร ซึ่งเราสามารถวัดค่าได้ในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร การทดลองจะใช้วงจรในรูปที่ 3.5 ในการทดลองชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะอยู่ในไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิ 77 เคลวิน มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) ทำการป้อนสนามแม่เหล็กในขณะที่ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าให้กับชั้นสาร โดยเริ่มจากค่าสนามแม่เหล็ก $B = 10$ a.u. จากนั้นลดค่าสนามแม่เหล็กจนมีค่าเป็นศูนย์ ทำการวัดแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสวิกฤต จากนั้นลดกระแสลงเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นทีละ 10 a.u. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันที่วัดได้ที่กระแสวิกฤตหลังจากลดสนามแม่เหล็กลงเริ่มคงที่



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร (V) กับสนามแม่เหล็กภายนอก

จากกราฟในรูปที่ 3.13 แสดงผลการจำสภาพแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Gd-Ba-Cu-O$ พบว่าที่สนามแม่เหล็กเท่ากับ 60 a.u. ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเริ่มมีการจำสภาพแม่เหล็กขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จาก เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเท่ากับ กระแสวิกฤตจะเริ่มมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสาร (V_{mem}) และเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กภายนอกขึ้นอีก ค่า V_{mem} จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงค่าสนามแม่เหล็ก 320 a.u. V_{mem} ก็จะเริ่มคงที่ จากปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่า เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีขนาดแรงพอที่จะทะลุเข้าไปในจุดแทรกได้ จุดคอดทุกจุดจะขาดออกจากกัน และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากจนสนามแม่เหล็กเข้าไปในจุดแทรกจนเต็ม จะเป็นช่วงการจำสภาพแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น V_{mem} จะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากผลการทดลองในรูป 3.12 และรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบ(I_N) คงที่ ($B = 60$ a.u.) จะเป็นค่าที่ทำให้ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มมีการจำสภาพแม่เหล็กขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์

ในปริญญาพนธ์ฉบับนี้ เบื้องต้นได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในส่วนของโครงงานอาจกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ซึ่งสร้างโดยกระบวนการสร้างมาตรฐานของห้องวิจัยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า พบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้น นั่นคือ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ซึ่งตามปกติแล้วจะไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดอื่น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบและปริมาณกระแสวิกฤต เมื่อพิจารณาจากกระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O ถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาเป็น 930 องศาเซลเซียส และแรงดันที่ใช้เป็น 1.2 ตัน ซึ่งอุณหภูมิและแรงดันที่ใช้ได้ผ่านการทดสอบมาแล้ว ซึ่งจะทำให้ได้กระแสวิกฤตสูงสุด

สำหรับการทดลองนี้ ต้องการศึกษาดังผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ โดยให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเริ่มต้นที่ 10 a.u. ($B=10$ a.u.) แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน จากนั้นเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กขึ้นเรื่อยๆ โดยเพิ่มจนถึง 100 a.u. ($B=100$ a.u.) ซึ่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับชิ้นสารนั้น ได้มาจากการป้อนกระแสไฟตรงไหลผ่านขดลวด ($B=1$ a.u. คือ การป้อนกระแสไฟตรงผ่านขดลวดตัวนำเป็นปริมาณ 1 mA) จากผลการทดลองพิจารณาได้ว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นทำให้กระแสวิกฤตและขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีค่าลดลงและส่งผลทำให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองยังพบอีกว่าตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบสามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ได้ด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 10 ครั้ง พบว่าที่ค่าสนามแม่เหล็ก 60 a.u. ซึ่งเป็นค่าที่ชิ้นสารเริ่มเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก สามารถควบคุมให้ตำแหน่งกระแสที่เกิดความต้านทานเชิงลบคงที่ และถ้าทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่ชั้นสารมากขึ้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชั้นสาร(V_{mem}) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงค่าสนามแม่เหล็ก 320 a.u. V_{mem} ก็จะเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นช่วงการจำสภาพแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตาราง คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
Gd	157.26	$1,312 \pm 15$	3,270
Ba	137.34	725 ± 5	1,637
Cu	63.546	1,083	2,538
O	15.99	-218.8	-183

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้