

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาภาวะการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

A STUDY OF MAGNETIC MEMORIZATION IN $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$
CERAMIC SUPERCONDUCTOR

โดย

นาย ปิยะศักดิ์ พิวงษ์

นาย กฤษณะ ศรีทอง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 73168

วัน,เดือน,ปี..... 6 ก.ค. 2550

b. 14781221

i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสถานะการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
ชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก
A STUDY OF MAGNETIC MEMORIZATION IN $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$
CERAMIC SUPERCONDUCTOR



โดย
นาย ปิยะศักดิ์ ผิวงำ รหัส 46015232
นาย กฤษณะ ศรีทอง รหัส 46015253

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ดร.วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาสภาวะการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

แบบเซรามิก

ผู้จัดทำ

นาย ปิยะศักดิ์ ศิวขำ รหัส 46015232

นาย กฤษณะ ศรีทอง รหัส 46015253



(รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสถานะการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

$GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

นายปิยะศักดิ์ ผิวขำ รหัส 46015232

นายกฤษณะ ศรีทอง รหัส 46015253

รศ.ดร.วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอ การศึกษาสถานะการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก ซึ่งเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ที่ใช้กระบวนการสร้างมาตรฐาน ที่สร้างจากห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยพิจารณาเมื่อทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชั้นสารด้วยปริมาณที่มากพอ ชั้นสารจะเข้าสู่สถานะการจำแม่เหล็ก โดยดูได้จากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชั้นสาร และยังพบว่าขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (ΔV) ที่เกิดความต้านทานเชิงลบ มีค่าสูงที่สุดในสถานะที่ชั้นสารเริ่มจำแม่เหล็ก และลดลงไปเรื่อยๆ เมื่อมีการจำสภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้น

A STUDY OF MAGNETIC MEMORIZATION IN $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ CERAMIC SUPERCONDUCTOR

Mr. Piyasak Phiwkham ID.46015232

Mr. Kridsana Srilong ID.46015253

Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang Advisor

Educational Year 2005

Abstract

This report presents magnetic memorization in $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic superconductor, a high temperature superconductor fabricated by standard processes, available at superconductor lab, Electronics Research Center (ERC.) .This, superconductor material is situated magnetic memorization when the proper magnetic field is applied.Voltage drop levels at negative resistance, in superconductor is maximum at the starting magnetic memorization stage and decreasing as the magnetic memorization increasing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้เกิดขึ้นด้วยความกรุณาของรศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางแก้ไขปัญหาและให้การสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบคุณ คุณวิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรมและรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำลำดับขั้นตอนของการทำปริญญาานิพนธ์นี้ ทั้งคอยดูแลเอาใจใส่มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้ในด้านต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ปิยะศักดิ์ ผิวขำ

(นาย ปิยะศักดิ์ ผิวขำ)

กฤษณะ ศรีทอง

(นาย กฤษณะ ศรีทอง)

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| คำนำ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญรูป..... | VI |
| ศัพท์เทคนิค..... | VIII |
| สัญลักษณ์..... | IX |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 1 |
| 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ..... | 4 |
| 1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)..... | 4 |
| 1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: H_c)..... | 5 |
| 1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)..... | 5 |
| 1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 6 |
| 1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)..... | 6 |
| 1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)..... | 7 |
| 1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)..... | 8 |
| 1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 9 |
| 1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก..... | 9 |
| 1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 | 9 |
| 1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)..... | 11 |
| 1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ..... | 12 |
| 1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)..... | 12 |
| 1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance)..... | 12 |
| 1.7 ขอบเขตงานวิจัย..... | 13 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 14 |
| 2.1 บทนำ..... | 14 |
| 2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก..... | 14 |
| 2.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)..... | 14 |
| 2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน..... | 15 |
| 2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค..... | 17 |
| 2.3.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า..... | 18 |
| 2.4 การจำสภาพแม่เหล็ก..... | 19 |
| บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง..... | 21 |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง..... | 21 |
| 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 21 |
| 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 22 |
| 3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnace and Temperature control)..... | 22 |
| 3.1.4 ชุดวัดกริ้อัตตราไซนิค..... | 23 |
| 3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... | 23 |
| 3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 24 |
| 3.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 24 |
| 3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา..... | 25 |
| 3.3 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า..... | 27 |
| 3.4 การทดลองการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 28 |
| 3.5 การทดลองการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบกลับขั้วสนามแม่เหล็กภายนอก..... | 30 |
| สรุป..... | 33 |
| ภาคผนวก..... | 34 |
| กิตติกรรมประกาศ..... | 35 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes..... | 2 |
| 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส..... | 5 |
| 1.3 ปฏิกิริยาการนำไมสเนอร์..... | 7 |
| 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน..... | 8 |
| 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 8 |
| 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 และ ข) ประเภทที่ 2..... | 10 |
| 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ และ ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ..... | 11 |
| 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)..... | 12 |
| 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)..... | 13 |
| 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ก) การผลักแม่เหล็ก และ ข) การดูดแม่เหล็ก..... | 15 |
| 2.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง..... | 16 |
| 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 16 |
| 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 16 |
| 2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 18 |
| 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O..... | 18 |
| 2.7 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 19 |
| 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในขณะที่เกิดการจำ แม่เหล็กขึ้น..... | 20 |
| 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด..... | 22 |
| 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ..... | 22 |
| 3.3 ชุดวัดกริฮ์สตราโซนิค..... | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า..... | 23 |
| 3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ | 26 |
| 3.6 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง..... | 27 |
| 3.7 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 27 |
| 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า..... | 28 |
| 3.9 วงจรที่ใช้ทดสอบวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ..... | 29 |
| 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{mag} และ V_{mem} | 29 |
| 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) และแรงดันตกคร่อมชั้นสารในสภาวะการจำสภาพแม่เหล็ก(V_{mem})..... | 31 |
| 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) และแรงดันตกคร่อมชั้นสารในสภาวะการจำแม่เหล็ก(V_{mem}) เมื่อให้แม่เหล็กขั้วตรงข้าม..... | 32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

| | |
|------------------------------|----------------------------|
| กระแส | Current |
| แกดโดลิเนียมออกไซด์ | Gadolinium Oxide |
| เกาส์ | Gauss |
| ความเข้มสนามแม่เหล็ก | Magnetization |
| ความเข้มสนามได้ในทางสุญญากาศ | Permeability of free space |
| ความเข้มสนามได้สัมพัทธ์ | 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 |
| ปรากฏการณ์ซิลสบี | Silbsbee Effect |
| ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ | 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|------------|---|-------------------|
| B | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก | wbm^{-2} |
| B_s | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด | 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

วันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 1987 ณ ห้อง ชัตตันบอสรูม โรงแรมนิวยอร์ก ฮิลตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา นักฟิสิกส์ นักข่าว และผู้สนใจงานด้านฟิสิกส์ จำนวนมากถึง 3,800 คน ได้ไปเข้าร่วมประชุม งานวันประชุมสมาคมนักฟิสิกส์อเมริกัน ในสาขาคอนเดนซ์ แมตเตอร์ ฟิสิกส์ เป็นเรื่องที่น่าสนใจ ที่สุดในรอบหลายทศวรรษที่ผ่านมา นั่นคือการรายงานผลการค้นพบ "ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง" (High - temperature superconductor) นับแต่นั้นมาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็รู้จักกันไปทั่วโลก และในขณะนั้นจนมาถึงปัจจุบันก็มีการวิจัย แข่งขันกันอย่างจริงจังและแพร่ไปยังประเทศต่าง ๆ ที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี เช่น สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductor) คือ ตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายในเป็นศูนย์ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้โดยสะดวกจึงไม่เกิดความต่างศักย์และไม่มีการสูญเสียพลังงาน ในรูปของความร้อน ดังที่ได้เกิดขึ้นในโลกหะตัวนำทั่วไป จึงทำให้มีการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์และช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาสร้างเป็นสายเคเบิลแทนโลหะ การใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแทนแท่งแม่เหล็กถาวร และใช้ทำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จึงช่วยให้อุปกรณ์ต่างๆ มีขนาดเล็กลงและไม่มีการสูญเสียในรูปของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกด้วย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

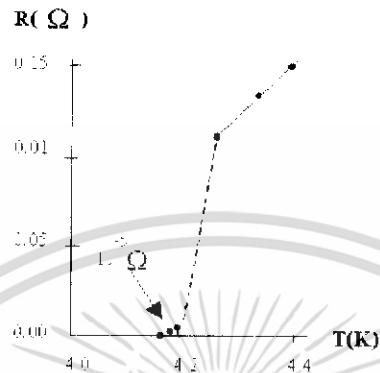
การค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ แบ่งได้เป็น 2 ยุคด้วยกัน คือ ยุคเริ่มแรกที่เกิดการค้นพบและวิจัย ก็คือยุคที่ค้นพบปรากฏการณ์ การนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity) ในปี ค.ศ. 1911 และในยุคที่สอง คือ เริ่มในปี 1986 ซึ่งเป็นยุคของการพัฒนาให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงขึ้น



ในยุคแรกของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น เริ่มขึ้นเมื่อนาย ไฮค์ คาเมอร์ลิงค์ ออนเนส(Heike Kamerlingh Onnes)นักฟิสิกส์ ชาวเนเธอร์แลนด์ แห่งมหาวิทยาลัย ลีเดน(Leiden University) ได้ค้นพบสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในปี ค.ศ. 1911ซึ่งเขาได้ใช้ปรอท(mercury, Hg)เป็นตัวนำ โดยการแช่แข็งไว้ในฮีเลียมเหลว แล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และเรียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะที่เกิดขึ้นนี้ว่า **สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด** และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า **อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c)**



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นเขาได้พยายามทดลองกับ ตะกั่ว และดีบุก ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน เมื่อเห็นผลเช่นนั้นเขาก็ได้ทดลอง ต่อไปโดยนำโลหะตัวนำเหล่านี้มาหลอมเป็นวง นำไปแช่เย็นในฮีเลียมเหลวปล่อยกระแสไฟฟ้าลงไป จากนั้นแยกออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือแม่เหล็กภายนอก โดยแช่แข็งไว้ตลอดเวลา หนึ่งปีต่อมา นำมาตรวจสอบอีกครั้ง พบว่ายังมีกระแสไฟฟ้าไหลอยู่ในสารตัวนำยิ่งยวดวงแหวนนี้เหมือนเดิม ทำให้สามารถบอกได้ว่า สารตัวนำยิ่งยวดเหล่านี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย จากการค้นพบนี้เองทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลในปี ค.ศ. 1913 ในครั้งนั้นเขายังพบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเหล่านี้สามารถผลิตสนามแม่เหล็กหรือสร้างสนามแม่เหล็กความเข้มสูงออกมาได้ด้วย

หลังจากการค้นพบของ ฮอนเนส ก็มีนักฟิสิกส์เป็นจำนวนมากที่ได้หันมาทำการวิจัยในเรื่องนี้ และพยายามเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้นอีก กระทั่งในปี ค.ศ. 1933 สามารถทำให้เพิ่มอุณหภูมิได้เพียง 10 เคลวิน ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิได้ไม่มาก แต่สิ่งที่ค้นพบในปีนั้นคือ ได้มีการค้นพบว่า สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางชนิดมีคุณสมบัติของแม่เหล็กไดอามagnetic) ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ “ไมสเนอร์”(Meissner Effect) นักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบปรากฏการณ์นี้คือ Walter Meissner and Robert Ochsenfeld ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจำพวกโลหะเท่านั้น แต่จะไม่เกิดกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นตัวนำผสม ในโอเบียม วานาเดียม โลหะผสมและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิมที่อุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสม ของธาตุไนโอเบียม(Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 20 เคลวิน และสามารถใช้ไฮโดรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้เป็นครั้งแรก



คาร์ อเล็ก มุลเลอร์



โจอันเนส จอร์จเบเดนอร์ช

ยุคที่สองของการพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เริ่มขึ้นเมื่อวันที่ 27มกราคม ค.ศ. 1986 เมื่อ คาร์ อเล็ก มุลเลอร์ และ โจอันเนส จอร์จ เบเดนอร์ช นักวิจัยแห่งห้องปฏิบัติการของไอบีเอ็มได้พัฒนาจนได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ให้อุณหภูมิวิกฤตสูงถึง30 เคลวิน และทำมาจากเซรามิก ซึ่งพวกเขาได้ศึกษามาเป็นเวลากว่า 20 ปีแล้วเกี่ยวกับเซรามิก ต่อมาอีกไม่กี่สัปดาห์พวกเขาก็สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตได้อีก 5 เคลวิน โดยใช้ออกไซด์ของแลนทานัม,แบเรียมและทองแดง มาบดผสมกัน ตั้งเตาเผา ด้วยความร้อนประมาณ 1,100องศาเซลเซียส



C.W. Chu

ในเดือนธันวาคมในปีเดียวกันนั้นคณะนักฟิสิกส์ของห้องปฏิบัติการเบลล์แห่งบริษัท เอทีแอนด์ที ได้ประสบความสำเร็จในการทำให้เซรามิกสูตรเดียวกันกับของไอบีเอ็ม เกิดสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 39 เคลวิน ในขณะที่นักวิจัยที่ห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยฮูสตัน นำโดย นาย C.W.Chu ซึ่งได้ศึกษาเรื่องตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 ได้ประกาศว่าเขาสามารถทำให้เซรามิก สูตรเดียวกันนี้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 52 เคลวินเมื่อเพิ่มความดันให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประมาณ 10,000-12,000 เท่าของความกดดันบรรยากาศปกติ และเมื่อเขาได้ทดลองเปลี่ยนสารมาเป็นสตรอนเทียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าเพิ่ม 2 เคลวิน เป็น 54 เคลวิน เป็นเวลาเดียวกับที่ คณะวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยฮันต์วิลล์ อลาบามา นำโดย มอร์ควาน วู ซึ่งเคยเป็นลูกศิษย์ของ Chu ได้เปลี่ยนมาใช้อิตเรียม(Itrium:Y) และสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นสูงถึง 93 เคลวิน ทีเดียวกว ในทีแรกเขายังไม่เชื่อว่าข้อมูลนี้จะถูกต้องจึงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมมือกับ Chu ผู้เป็นอาจารย์และสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 98 เคลวิน ในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 1987 สร้างความตื่นเต้นแวงวงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ในไนโตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน เป็นตัวหล่อเย็นที่มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบนี้เป็นสารประกอบ ของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดงออกซิเจน ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) แต่ในปัจจุบันที่ห้องทดลอง Superconductor ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้แกดโดลิเนียม (Gd) อิตเทรียม เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ไปเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวิน

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการ ปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีที่จะต้องมีการมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่มีสูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานที่กว้างขึ้น

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{1}{4} T_c$ นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า T_c เข้าใกล้ 100K อย่างเช่นชิ้นสารที่ใช้มีค่า $T_c \approx 95\text{K}$ ก็สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ T_c มากกว่า 400K อันเป็นสิ่งที่ยังวงการวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

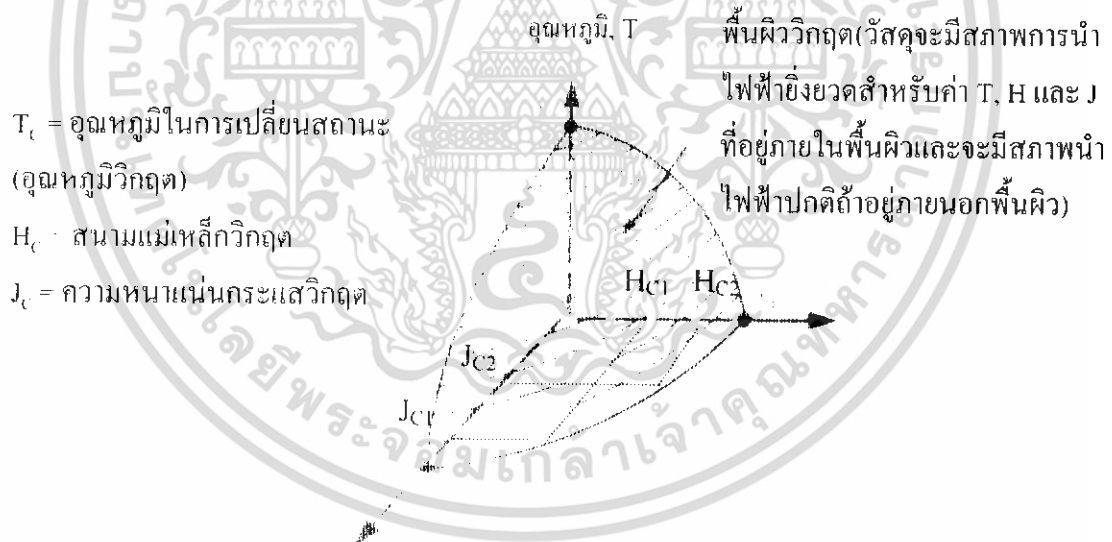
1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต(Critical Magnetic Field: H_c)

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

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสารหรือมีความต้านทานเกิดขึ้น เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current: I_c)

โดยทั่วไปการพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น มักพิจารณาในรูปของความหนาแน่นกระแสวิกฤต(Critical Current Density: J_c) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คืออัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะ การนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่น กระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต J_c เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสาร เป็น 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) และ ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามี่ค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งนั่นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (diamagnetic) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77K

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 | คือ | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก |
| H | คือ | ความเข้มสนามแม่เหล็ก |
| M | คือ | สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization) |
| χ_m | คือ | สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility) |
| μ_0 | คือ | ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of frees pace) |
| μ_r | คือ | ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability) |

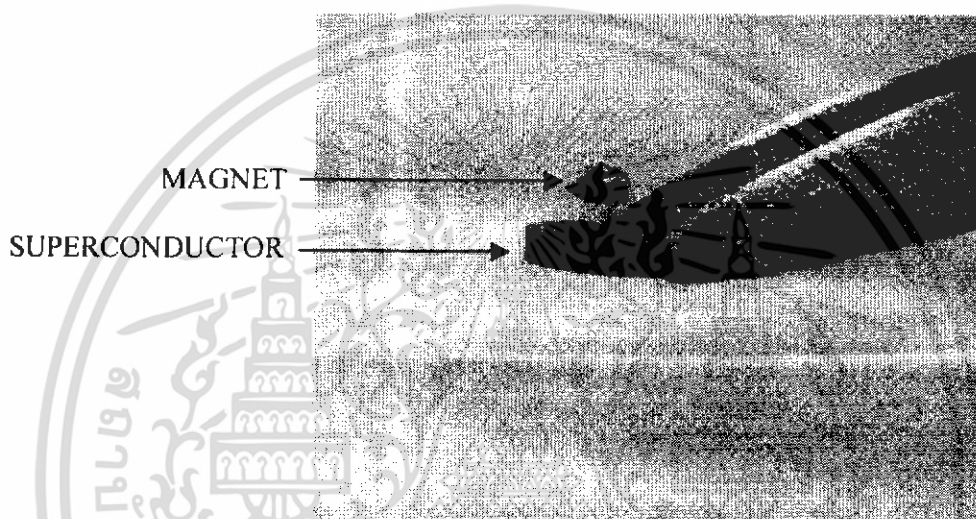
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้ $B = 0$ ทำให้

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

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

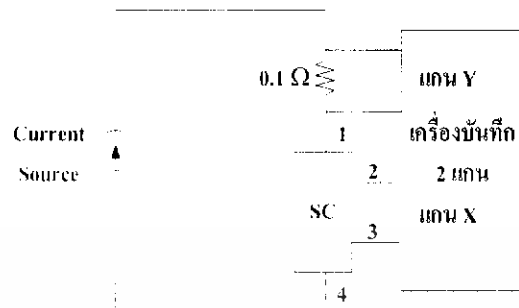
$$\mu_r = 0 \quad (1.6)$$



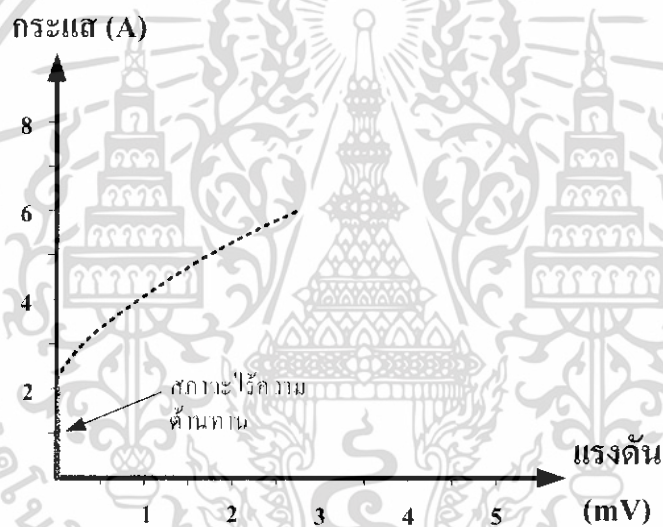
รูปที่ 1.3 ปรัชการณไมสเนอร์

1.3.2 ปรัชการณไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ชิ้นสารนั้นจะมี สภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสารได้ถูกแช่อยู่ภายในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตได้ว่า กราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกนแนวนั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อไม่มีกระแสไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A}$) จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นสารเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบี่ยงออกจากแกนแนวนั้น แสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่ชิ้นสารจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต $H_c(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิวิกฤต สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ $H_c(T_c) = 0$ สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

| | | | | |
|-------|-----------|--------------------|-----------------|-------------------------|
| เมื่อ | $T < T_c$ | สนามแม่เหล็กภายนอก | $H_u = 0$ | เป็นสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด |
| | $T < T_c$ | สนามแม่เหล็กภายนอก | $H_c > H_u > 0$ | เป็นสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด |
| | $T < T_c$ | สนามแม่เหล็กภายนอก | $H_c < H_u$ | เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด |

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

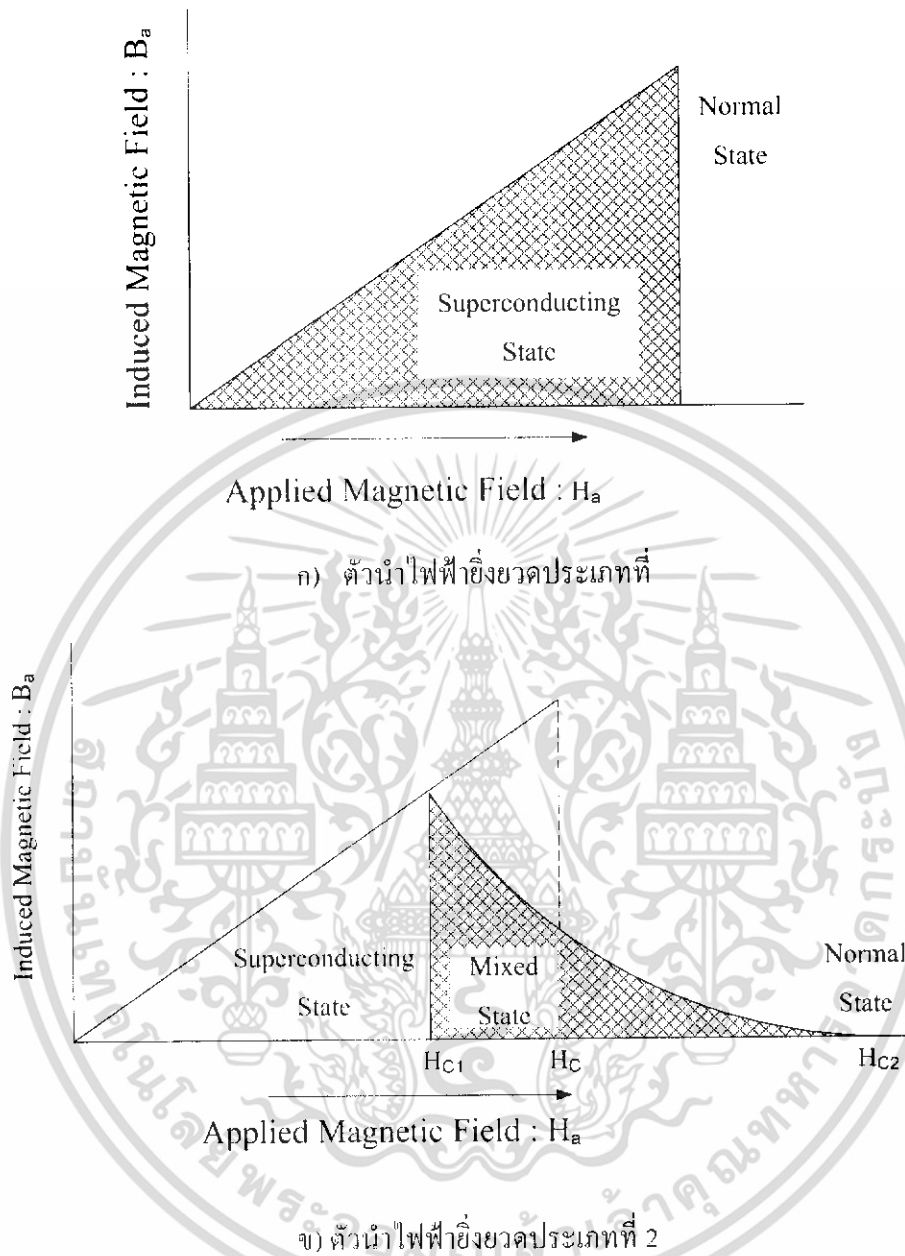
$H_c(T)$ - สนามแม่เหล็กวิกฤต

$H_c(0)$ - สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั่นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ($\vec{M} = -\vec{H}$) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect) และมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอะที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) แกลโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, $\text{HgBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_4$ เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect) นั้นเอง



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

พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (H_a) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว ค่า Magnetization (M) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

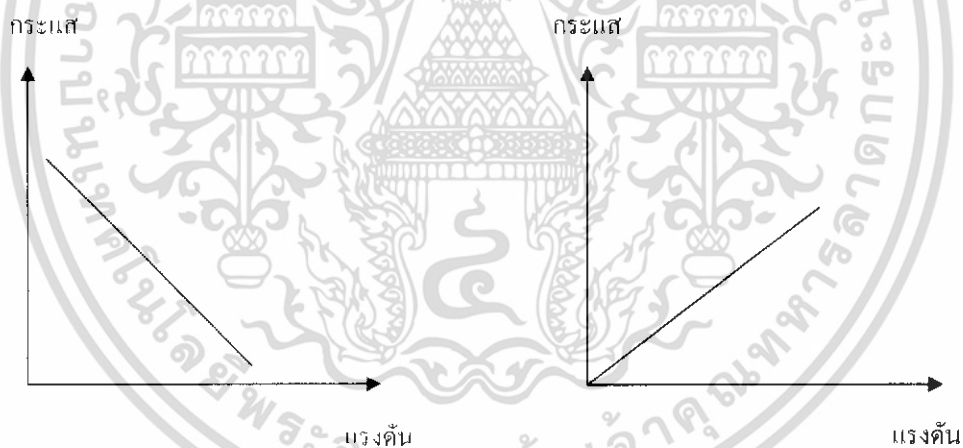
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_c) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชั้นสารได้ นั่นแสดงว่าภาวะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อค่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{c1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชั้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{c2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชั้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

1.6 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.7



ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ

ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ก) ชนิดที่มีความต้านทานเชิงลบ

ข) ชนิดไม่มีความต้านทานเชิงลบ

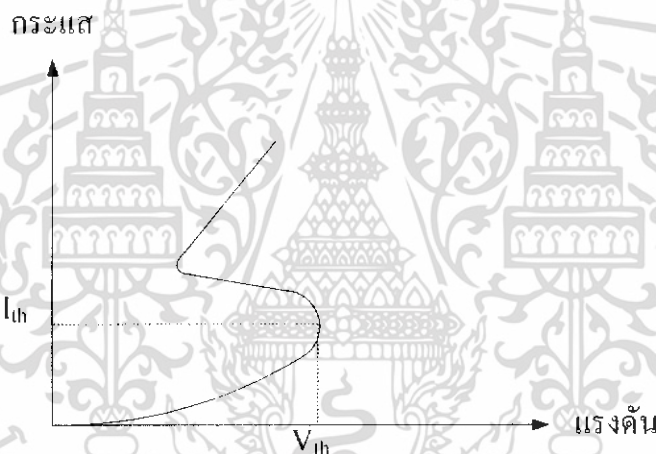
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

ความต้านทานเชิงลบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.6.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current controlled negative resistance)

ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะกราฟคล้ายตัวอักษร S ดังรูปที่ 1.8 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้สามารถเกิดได้โดยการควบคุมกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแสมีค่าเท่ากับค่าวิกฤต I_{th} (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้น จึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current Controlled Negative resistance (CCNR) ซึ่งจะพบในอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ Silicon-Controlled-rectifier(SCR), Uni-Junction Transistor(UJT) เป็นต้น

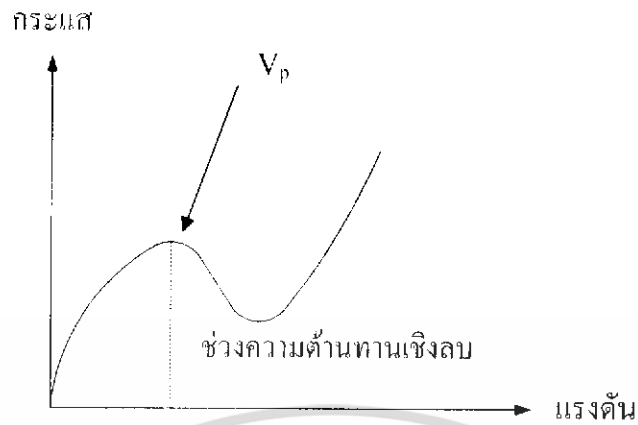


รูปที่ 1.8 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)

1.6.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage Controlled Negative Resistance)

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับตัวอักษร N ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง (Peak Voltage) จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage Controlled Negative Resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.9 ลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

1.7 ขอบเขตงานวิจัย

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก เนื้อหาของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 3 บท แก่ โครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า รวมถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ ที่เกิดขึ้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

บทที่ 3 เป็นการทดลองและผลการทดลอง เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (ในอัตราส่วน 1 : 2 : 3) สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

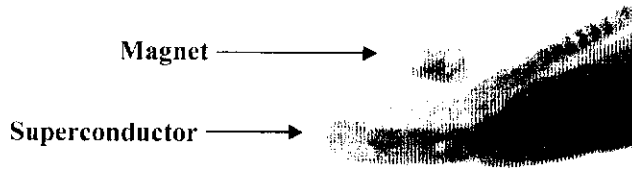
ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ(Low Temperature Superconductor :LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง(High Temperature Superconductor :HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง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

2.2 การวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบเซรามิก

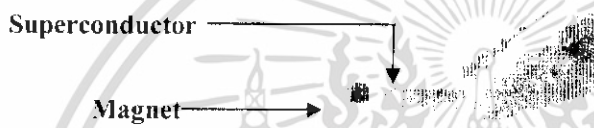
เป็นการวัดคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ มีดังนี้

2.2.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์(Meissner Effect)

เป็นวิธีการทดสอบเม็ดสารว่าอยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) ถ้าเม็ดสารมีสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะแสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์ขึ้น โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสาร จากการทดสอบพบว่าเม็ดสารมีการผลักแม่เหล็กให้ลอยขึ้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้าน เพื่อหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เรียกว่า กระแสคงสภาพ (Persistent Current) ดังรูปที่ 2.1 ก) และที่น่าสนใจคือ บริเวณขอบของเม็ดสารบางส่วนมีการดูดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.1 ข) การที่บางส่วนของเม็ดสารมีการดูดแม่เหล็กนั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากแกดโดลิเนียม (Gd) ที่นำมาใช้สร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติก



ก) การผลักแม่เหล็ก



ข) การดูดแม่เหล็ก

รูปที่ 2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ก) การผลักแม่เหล็ก ข) การดูดแม่เหล็ก

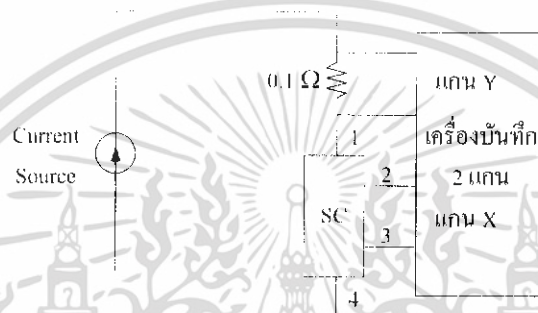
2.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านความต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร ซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปแบบของแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้ง สำหรับเมื่อดำเนินการวัดชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดยิ่งยวดให้มีรูปทรงดังรูปที่ 2.2

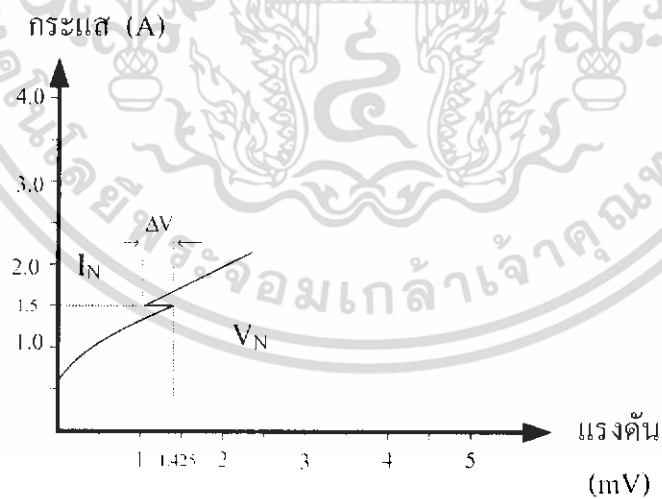
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ชินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในรูปที่ 2.4 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายาวชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ได้แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นซึ่งมีความแตกต่างจากตัวนำไฟฟ้ายาวชนิดอื่นซึ่งจะไม่พบปรากฏการณ์นี้ ความต้านทานเชิงลบที่วัดได้เกิดขึ้นที่ตำแหน่งกระแส (I_x) เท่ากับ 1.5 A และที่แรงดัน (V_x) เท่ากับ 1.425 mV ซึ่งมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) เท่ากับ 0.25 mV และจะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ S

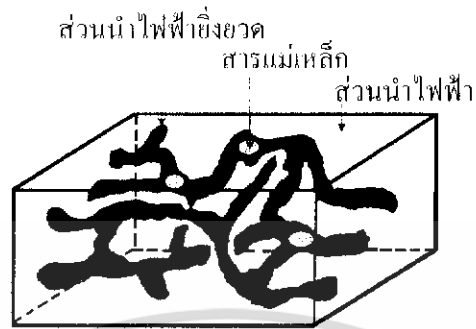
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้ายาวชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่สร้างขึ้น มีลักษณะเนื้อสารเป็นเซรามิก และจากการทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect) ทำให้เราได้ทราบว่า มีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ในเนื้อสาร ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแกลโคลิเนียม จากแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายาวชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ พิจารณาได้ว่า ในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายาวที่สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายาวอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายาว การที่เม็ดสารสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายาวได้นั้น หมายความว่า จะต้องมีส่วนเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายาวเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง แต่ลักษณะการเชื่อมต่อจะไม่สม่ำเสมอ ก็มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งและการเชื่อมต่ออย่างหลวม หรือที่เรียกว่า จุดคอด ซึ่งเกิดจากการอัดผงสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้สารเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายาวนี้ยังมีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในอีกด้วย ดังรูปที่ 2.5

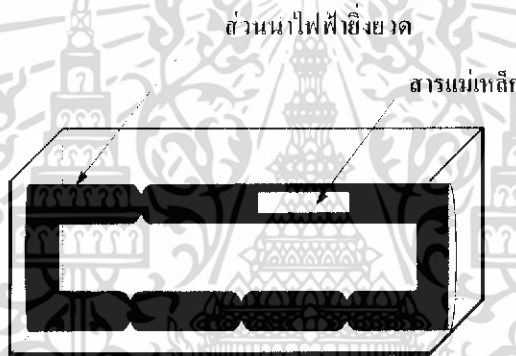
แต่เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายาวนี้ จะถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้า ยาว 2 ท่อ ซึ่งในส่วนของท่อด้านล่าง จะมีบริเวณจุดคอด 3 จุด ส่วนท่อบนมีบริเวณจุดคอด 1 จุด และมีส่วนที่เป็นสารแม่เหล็กปะปนอยู่ภายในท่อทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.6 ถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า การที่ตัวนำไฟฟ้ายาวจะเสียดสภาพได้นั้น เกิดจากส่วนที่เป็นท่อตัวนำไฟฟ้ายาวขาดออก และบริเวณที่ขาดง่ายที่สุดคือ บริเวณส่วนของจุดคอด ในส่วนของท่อตัวนำไฟฟ้ายาวบริเวณที่มีสารแม่เหล็กปะปนอยู่ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นปริมาณมากพอ ในส่วนนี้ก็จะขาดออกและขาดเป็นบริเวณกว้าง อันเนื่องมาจากสารแม่เหล็กที่อยู่ภายในท่อมีขนาดใหญ่

73168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$



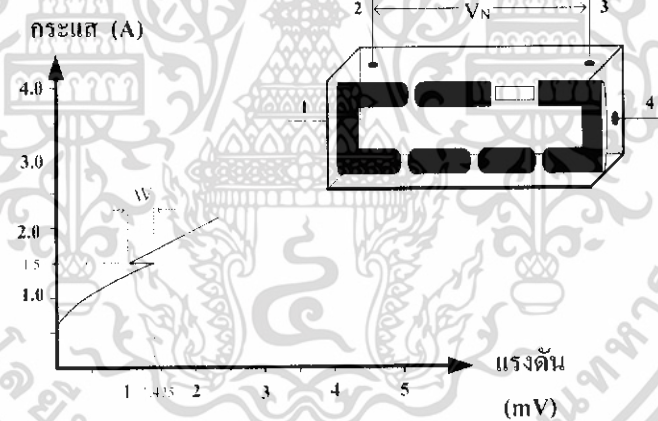
รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

2.3.1 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

จากราฟในรูปที่ 2.7 พบว่ากระแสวิกฤตมีค่ามีค่าเท่ากับ 0.45 A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยิ่งกว่า 0.45 A บริเวณจุดคอดทั้งหมดยังคงเชื่อมต่อกันอยู่ จึงไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร แต่เมื่อกระแสไหลผ่านเกินกว่า 0.45 A จะทำให้จุดคอดขาดออกจากกันทั้งหมด สาเหตุที่ทำให้จุดคอดขาดจากกัน เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า จึงทำให้เกิดความต้านทานขึ้นบริเวณที่จุดขาดและมีแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้น แต่เนื่องจากส่วนของจุดคอดด้านบนขาดเป็นปริมาณน้อยกว่าส่วนขาดของจุดคอดด้านล่างมาก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าเกือบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลผ่านท่อด้านบน ในสภาวะนี้เราจะพิจารณาแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารเฉพาะที่เกิดจากท่อด้านบนเป็นหลัก และเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆมีผลทำให้จุดขาดทั้งด้านบนและด้านล่างขยายตัวมากขึ้น แรงดันจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเราป้อนกระแสถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ท่อตัวนำไฟฟ้าที่ยาวคในส่วนของที่มีสารแม่เหล็กขาดออกจากกันเป็นบริเวณกว้าง เมื่อเทียบกับจุดขาด ทำให้ความต้านทานที่ท่อด้านบนมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามายังชิ้นสารจึงเปลี่ยนทิศทางมาไหลที่ท่อตัวนำด้านล่างซึ่งมีความต้านทานต่ำกว่า ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารลดลงอย่างรวดเร็วถึงค่าหนึ่งจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ” แต่ปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) ของความต้านทานเชิงลบที่ได้มานั้นมีขนาดเล็ก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างท่อบนล่างมีไม่มาก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก แรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น อันเนื่องมาจากจุดขาดขยายตัวนั่นเอง



รูปที่ 2.7 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การจำสภาพแม่เหล็ก (Magnetic Memorization)

ตามปกติเมื่อมีสนามแม่เหล็กปริมาณน้อยจากภายนอกมาตกกระทบชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้เกิดมีกระแสคงสภาพ (Persistent Current) และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นเพื่อหักล้างกับสนามแม่เหล็กภายนอก แต่ถ้าปริมาณสนามแม่เหล็กมีค่าสูงๆจะทำให้เกิดมีแม่เหล็กตกค้างอยู่ในชิ้นสารหรือเรียกว่าเกิดการแทรกแม่เหล็กขึ้น พิจารณารูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวนำไฟฟ้าทั่วไปและสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 0.5 A แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่ชิ้นสาร 0.1 T จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ และเมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกพบว่าคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่กลับสู่สภาพเดิมอย่างสมบูรณ์โดยยังคงมีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารอยู่ซึ่งมากกว่าขณะก่อนให้สนามแม่เหล็ก แรงดันที่ตกค้างอยู่นี้เรากล่าวได้ว่า เกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในขณะที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้น

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Gd-Ba-Cu-O) ซึ่งมีเนื้อสารเป็นแบบเซรามิก และเรื่องของการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับในบทนี้จะเป็นการศึกษาถึงสภาวะการจำแม่เหล็ก อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาในกระบวนการสร้างและรูปร่างของชิ้นสาร ที่มีต่อตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบ กระแสวิกฤต และขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันในขณะที่เกิดความต้านทานเชิงลบ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

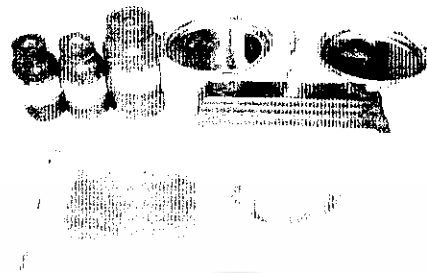
สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วยแกลโคลิเนียม(Gd_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

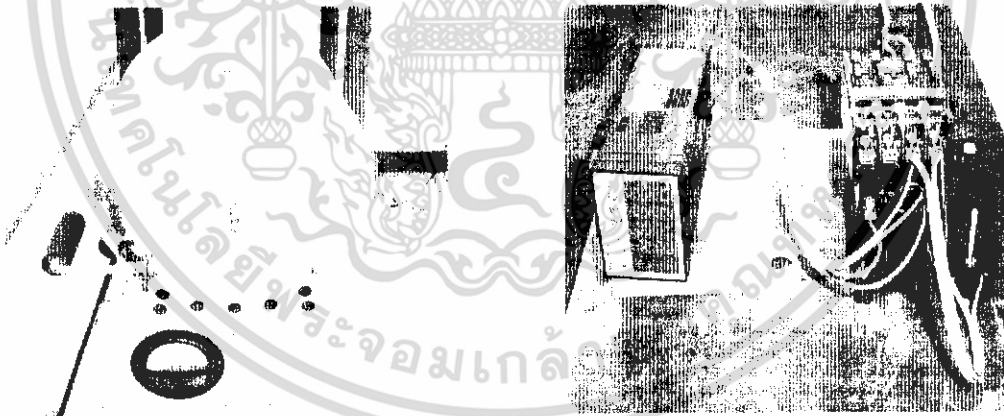
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnace and Temperature control)

เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นเตาเผาชนิดควบคุมอุณหภูมิที่สามารถให้ความร้อนได้จนถึง 1,050 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะต่อร่วมกับเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ชุดบัคกรี้อตตราโซนิค

เป็นชุดที่ใช้บัคกรี้อตตราโซนิคเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้ โดยที่ตะกั่วบัคกรี้อตตราโซนิคจะมีส่วนผสมของอินเดียม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ในส่วนของชุดบัคกรี้อตตราโซนิคจะมีการสั้นของหัวบัคกรี้อตตราโซนิค ซึ่งจะช่วยให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัคกรี้อตตราโซนิคและชิ้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก

รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรี้อตตราโซนิค

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constance current source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nano voltmeter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

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



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

จากตารางธาตุ จะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆดังนี้ $Gd = 157.26$ กรัม, $Ba = 137.34$ กรัม,

$Cu = 63.54$ กรัม, $O = 15.99$ กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

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

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

$CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545$ กรัมต่อโมล

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Gd_2O_3 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 362.49 กรัม

ถ้า ½ โมล ต้องเตรียมสาร = 181.245 กรัม

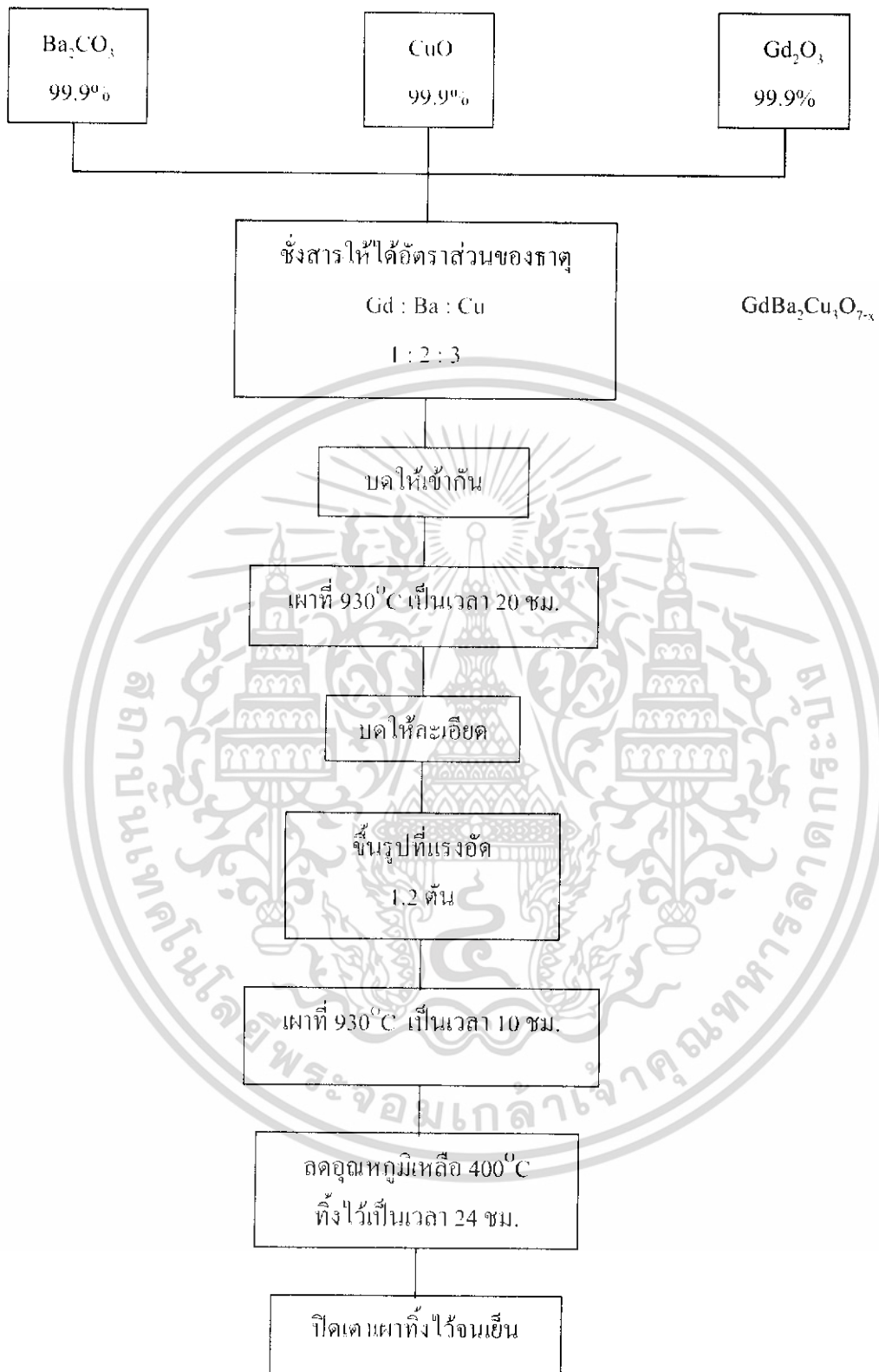
2) $BaCO_3$ 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 197.348 กรัม

ถ้า 2 โมล ต้องเตรียมสาร = 394.696 กรัม

3) CuO 1 โมล ต้องเตรียมสาร = 79.545 กรัม

ถ้า 3 โมล ต้องเตรียมสาร = 238.635 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

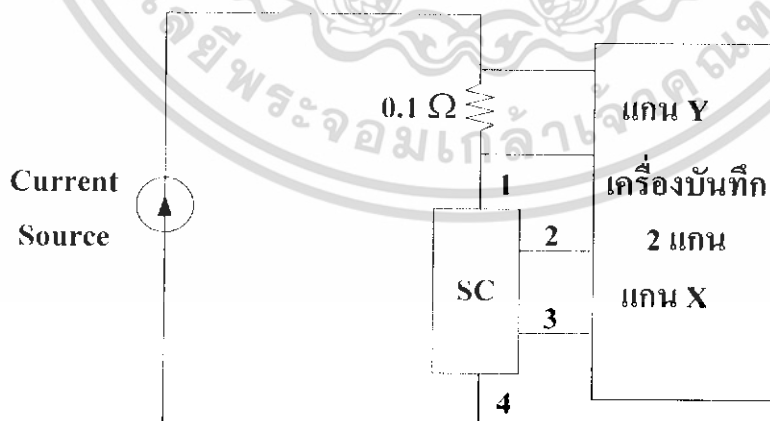
ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดย โดยใช่วงจรดังรูป 3.7 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดย จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้น จะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็ดสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.6



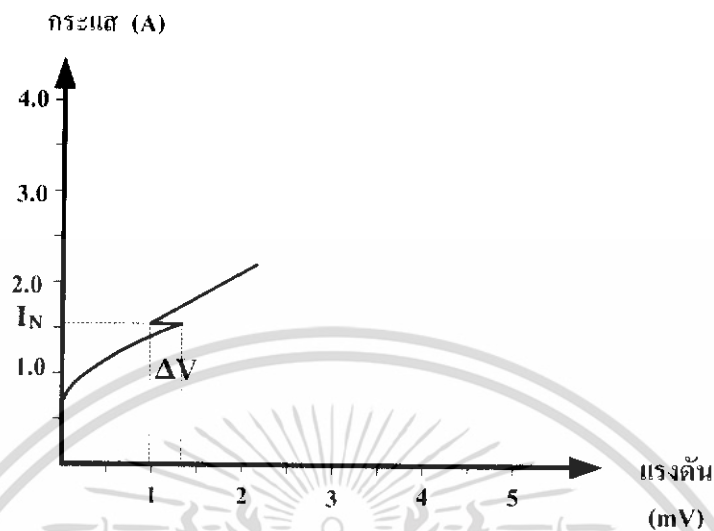
รูปที่ 3.6 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง

วงจรถ่ายทอดวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

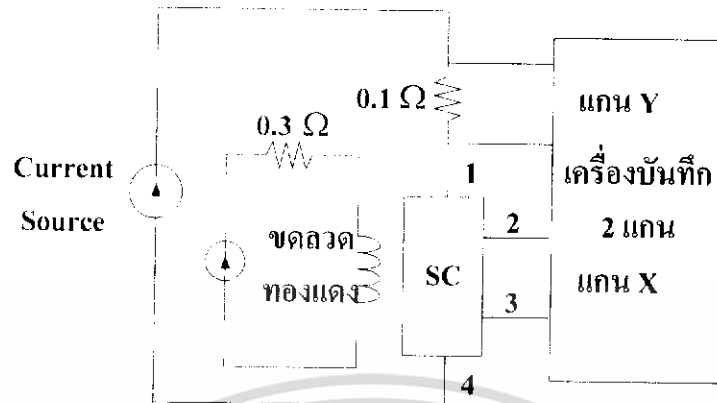
จากการทดลองรูปที่ 3.7 ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิการเผา 930 องศาเซลเซียส วัดปริมาณกระแสวิกฤตของชั้นสารได้เท่ากับ 0.7 A และปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานซึ่งลบเท่ากับ 0.38 mV

3.4 การทดลองการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$

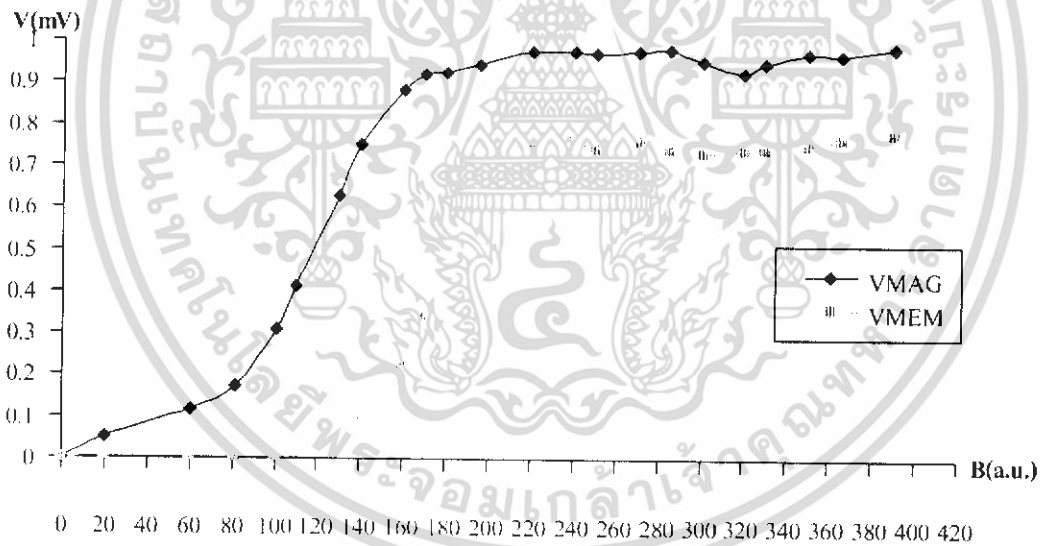
สภาวะการจำแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อเราให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงกว่าแก่ชั้นสาร เมื่อเกิดการจำแม่เหล็กขึ้นจะทำให้มีสนามแม่เหล็กคงค้างอยู่ในชั้นสารซึ่งเราสามารถวัดค่าได้ในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร การทดลองจะใช้วงจรในรูปที่ 3.9 ในการทดลองชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะอยู่ในไนโตรเจนเหลวอุณหภูมิ 77 เคลวิน มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

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

2. ทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นที่ละ $B=10$ a.u. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันที่วัดได้ที่กระแสวิกฤตหลังจากลดสนามแม่เหล็กลงเริ่มคงที่



รูปที่ 3.9 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน VMAG และ VMEM

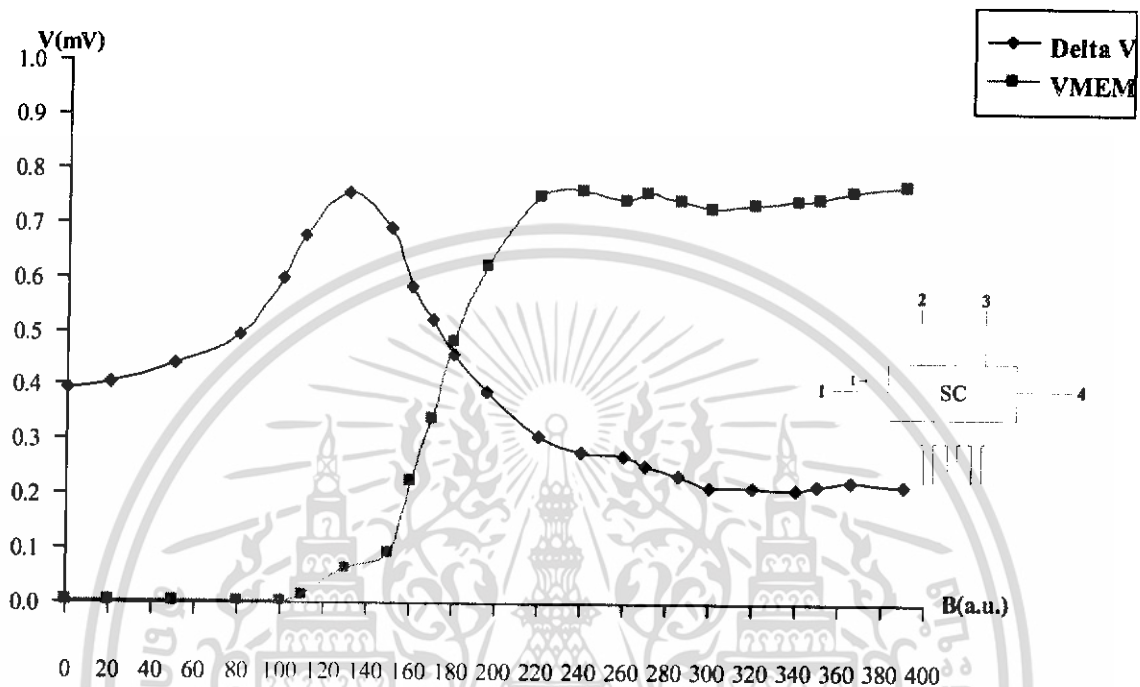
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร ขณะที่ย้อนสนามแม่เหล็กภายนอกข้างไว้กับชั้นสาร (VMAG) และแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสารหลังจากที่นำสนามแม่เหล็กภายนอกออกแล้ววัดค่าที่ค่ากระแสวิกฤตก่อนให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก คือแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อชั้นสารเกิดสภาวะการจำแม่เหล็ก (VMEM) จากรูปจะเห็นว่าสภาวะการจำแม่เหล็กจะไม่เกิดขึ้นในทันทีทันใด แต่จะเกิดขึ้นเมื่อค่าแรงดันที่ตกคร่อมชั้นสาร (VMAG) เริ่มมีค่าคงที่ จะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร (VMEM) เริ่มเพิ่มขึ้น ณ จุดที่ แรงดันตกคร่อมชั้นสารขณะให้แม่เหล็กภายนอกมีค่าคงที่ (VMAG)

3.5 การทดลองการจำแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบให้สนามแม่เหล็กภายนอกกลับทิศทาง

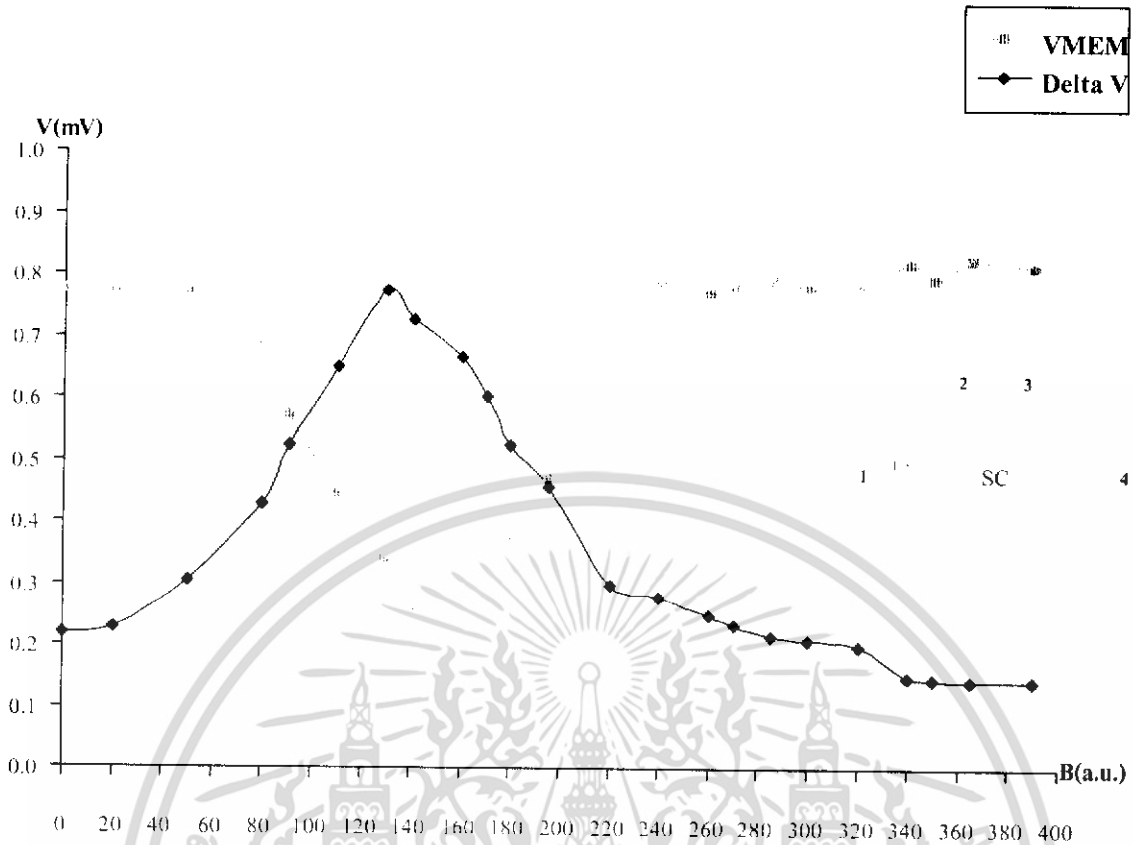
จากการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกพบว่า เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้กับชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเพิ่มขึ้นสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายมากขึ้น จะเห็นได้จากค่ากระแสวิกฤตที่ลดลงเมื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กภายนอก จนกระทั่งค่ากระแสวิกฤตลดลงจนเหลือศูนย์เมื่อสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายหมด เช่นเดียวกันที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Y-Ba-Cu-O ต่อไปเราจะทำการศึกษาการจำแม่เหล็กโดยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกกลับทิศทางกับการทดลองแรก ซึ่งมีการทดลองดังนี้

1. ย้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะที่ไม่ย้อนกระแสให้กับชั้นสาร โดยเริ่มจากค่าสนามแม่เหล็กที่ $B = 10$ a.u. จากนั้นนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก แล้วทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสวิกฤต
2. ทำการย้อนสนามแม่เหล็กภายนอกโดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 a.u. ทำการทดลองเช่นเดียวข้อที่ 1. จนกระทั่งแรงดันที่วัดได้ที่ค่ากระแสวิกฤต (I_c) ลดลงจนมีค่าคงที่หลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก
3. นำชั้นสารเดิมที่อยู่ในการจำสภาพแม่เหล็กมาทดลอง โดยการให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดในทิศทางข้ามกับการทดลองแรก โดยเริ่มจากค่าสนามแม่เหล็กที่ $B = 10$ a.u. จากนั้นลดค่าสนามแม่เหล็กภายนอกจนมีค่าเป็นศูนย์แล้วทำการวัดค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับกระแสวิกฤต (I_c)
4. ทำการย้อนสนามแม่เหล็กโดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 a.u. ทำการทดลองเช่นเดียวข้อที่ 3 จนกระทั่งแรงดันที่วัดได้มีค่าคงที่ ที่ค่ากระแสวิกฤตหลังจากการนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) และแรงดันตกคร่อมชั้นสารในสถานะการจำสภาพแม่เหล็ก (VMEM)

จากกราฟรูปที่ 3.11 แสดงผลการทดลอง การจำสภาพแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ 60 a.u. กราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงคือเริ่มมีการจำสภาพแม่เหล็กและขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) เริ่มเพิ่มขึ้นและเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ 130 a.u. พบว่าขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าสูงที่สุด และค่อยๆลดต่ำลงเมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้น แรงดันที่เกิดจากการจำสภาพแม่เหล็ก (VMEM) มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ไม่ว่าจะมีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้นเท่าใดก็ตาม



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) และแรงดันตกคร่อมชั้นสารในสภาวะการจำแม่เหล็ก (VMEM) เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศตรงกันข้าม

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการให้สนามแม่เหล็กกลับทิศทางกับชั้นสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ในช่วงที่เริ่มป้อนสนามแม่เหล็กขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ขณะเกิดความต้านทานเชิงลบค่อยๆ เพิ่มขึ้น และแรงดันตกคร่อมชั้นสารมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเกิดการจำสภาพแม่เหล็กในทิศตรงกันข้ามเป็นผลมาจากการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศตรงกันข้าม เมื่อชั้นสารเริ่มมีการจำสภาพแม่เหล็กขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะเกิดความต้านทานเชิงลบมีค่าสูงสุด การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้นจะทำให้การจำสภาพแม่เหล็กมีลักษณะเหมือนกับการให้สนามแม่เหล็กแบบปกติ คือแรงดันตกคร่อมชั้นสารเมื่อนำสนามแม่เหล็กออกมีค่าสูงขึ้นและขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าลดลง

บทสรุป

ชั้นสารเมื่อเริ่มจำสภาพแม่เหล็กค่าต่ำๆที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก $B=130$ a.u. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าสูงสุด เมื่อให้สนามแม่เหล็กมากกว่า 130 a.u. ชั้นสารมีการจำสภาพแม่เหล็กมากขึ้น ขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าลดลง

ชั้นสารมีการจำสภาพแม่เหล็กลดลง เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางตรงกันข้าม ที่ค่าสนามแม่เหล็ก $B=130$ a.u. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าสูงสุดเมื่อสนามแม่เหล็กมากกว่า 130 a.u. ชั้นสารมีการจำสภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (ΔV) มีค่าลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

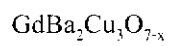
เอกสารอ้างอิง

1. Daniel Hunt V. 1989. **Superconductivity Sourcebook**. New York : John Wiley & Sons.
2. ดำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์. 2533. ฟิสิกส์ของแข็ง 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
3. Jha A.R. 1998. **Superconductor Tecnology**. New York: John Wiley & Sons.
4. Kasap S.O. 2000. Principles of Electrical Engineering Materials and Devices. : McGraw-Hill Companies.
5. วิสิษฐ วังศ์สุทธิธรรม นพดล สิทธิพล ชบา สุรียาอมรานนท์ และวิสุทธิ จูติรุ่งเรือง. “แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. 2544. หน้า 992-997.
6. พัชรินทร์ บุญรุ่งทรัพย์. “การศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ YBCO/GBCO.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
7. Matsuda M., Kikuchi A , Maeda T., Ishii M., Iwai Y., Takata M. and Yamashith T. 1988. “Observation of GdBa₂Cu₃O_{7-x} ceramic microstructure.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 27.L529-S30.
8. Matsuda M., Kikuchi A , Ishii M., Takata M., Yamashith T and Okamoto S. 1988. “Processing and Superconducting Properties of GdBa₂Cu₃O_{7-x} ceramics.” **Jpn. J. Appl. Phys.** 27. L1439-1441.
9. วิสิษฐ วังศ์สุทธิธรรม “การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Gd-Ba-Cu-O แบบเซรามิก” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตาราง คุณสมบัติของธาตุในสารประกอบที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด



| ธาตุ | น้ำหนักอะตอม | จุดหลอมเหลว (°C) | จุดเดือด (°C) |
|------|--------------|------------------|---------------|
| Gd | 157.26 | 1,312 ± 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้