

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของการเติมอะตอมของซิลเวอร์ที่มีต่อคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

**Effects of silver additions on the superconducting properties
of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductors**



รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 82447
วัน,เดือน,ปี..... 11 ก.ค. 2551

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

๓๑๔๗๒๑๔
๖.....
๗.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป
ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ผลของการเติมอะตอมของซิลเวอร์ที่มีต่อคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

**Effects of silver additions on the superconducting properties
of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductors**

โดย

นาย ชลิต อาติเกิด เลขประจำตัว 47012205

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง Effects of silver additions on the superconducting properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
superconductors

ผลของการเติมอะตอมของซิลเวอร์ที่มีต่อคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
ชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

ผู้จัดทำ

นาย ชลิต อาติเกิด



รศ.ดร. วิสุทธิ์ วิตุรุงเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการเติมอะตอมของซิลเวอร์ที่มีต่อคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

นาย ชลิต อาติเกิด รหัส 47012205

รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ได้นำเสนอผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือ Ag ที่มีต่อคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปของ โครงสร้างจุลภาค และ จุดคอค (Weak-Link) ภายในโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ จากการศึกษา ปรากฏการณ์ไมสเนอร์, ค่ากระแสวิกฤต, ผลของสนามแม่เหล็ก ภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด, Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) โดยทำการเติมอะตอมสารเจือลงใน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ในอัตราส่วนความเข้มข้นของ Ag ระหว่าง 0-20 wt% ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริงค่าต่างๆ ผลจากการศึกษาผลของ คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาคที่ได้จาก SEM และ XRD นั้น พบว่า I_c มีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นยังไปช่วยปรับปรุง Weak-Link ซึ่งทำให้ความหนาแน่น Pinning เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Effects of silver additions on the superconducting properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductors

Mr. Chalit Artikerd ID 47012205

Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang Adviser

Educational Year 2007

Abstract

The effect of Ag doping concentration on the microstructure, transport properties and weak-link profile of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{Ag}_x\text{O}_{7-x}$ bulk superconducting compound was investigated through Meissner Effect, Critical Current, critical current versus applied magnetic field, scanning electron microscope (SEM) and x-ray diffraction (XRD). The pure and Ag-doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ samples were prepared by the conventional solid-state reaction technique by adding silver up to 20 wt%. As well as the current transport properties. Ag doping up to a certain amount produces texturing that gives rise to a modification in the weak-link profile resulting in an enhanced strength of flux pinning .

คำนำ

ตัวนำยิ่งยวด (Superconductor) คือตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน กระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านได้ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนดังที่เกิดขึ้นในโลหะ ปัจจุบันนี้ในบางประเทศมีความก้าวหน้าในการนำตัวนำยิ่งยวดมาใช้งานได้เป็นอย่างดี เป็นต้นว่า มีการนำเคเบิลตัวนำยิ่งยวดมาใช้แทนเคเบิลโลหะ ซึ่งเป็นเคเบิลที่ประกอบขึ้นจากตัวนำยิ่งยวดนิโอเบียม - ดิคาเนียม การใช้ตัวนำยิ่งยวดที่ผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงแทนแม่เหล็กถาวรในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กลงแต่กำลังสูงขึ้น อีกตัวอย่างคือแผ่นวงจรที่ใช้เทคนิคพลาสมาสเปย์ (Plasma Spray Technique) ฟันผงตัวนำยิ่งยวดลงบนแผ่นรองรับ ทำให้ชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายสามารถลดขนาดลงได้โดยไม่มีอุปสรรคในเรื่องความร้อน ฯลฯ ในอนาคตจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้อย่างแน่นอนที่ตัวนำยิ่งยวดจะได้รับการพัฒนาจนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของชาวโลกมากขึ้น

โดยในรายงานเล่มนี้จะนำเสนอการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพของตัวนำยิ่งยวด YBCO ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยใช้ Ag มาเจือ

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการออกแบบและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งการจัดทำในครั้งนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าขาดการช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง และพี่ๆปริญญาโท และปริญญาเอกทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะต่างๆในการใช้งานอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนความรู้ใหม่ๆเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

อย่างไรก็ตามรายงานฉบับนี้อาจมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง หรืออาจจะไม่สมบูรณ์ ผู้จัดก็ขอรับคำชี้แนะ และข้อเสนอแนะต่างๆ เอาไว้ปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น และหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่นานก็น้อย



.....
(นายชลิต อาติเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

ปกกรอง

บทคัดย่อ

Abstract

สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ

1

1.1 ประวัติการค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2

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)

4

1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

5

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

5

1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

6

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลส์บี (Silsbee Effect)

7

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

7

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก [2]

7

1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

8

1.6 ขอบเขตเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

10

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

12

2.1 บทนำ

12

2.2 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

12

2.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

14

2.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

16

2.4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึก	18
บทที่ 3 การทดลอง	21
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง	21
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	21
3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance And Temperature Control)	22
3.1.4 ชุดวัดกริ้อลตราโซนิค	22
3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	23
3.2 การเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	24
3.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	26
3.3.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)	26
3.3.2 การวัดค่ากระแสวิกฤต	26
3.4 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	28
3.5 การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	29
3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึก	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
4.1 ผลของอุณหภูมิ Sintering ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	31
4.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	34
4.3 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$	36
4.4 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	36
4.5 ผลการศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM)	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	39
กิตติกรรมประกาศ	

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes	2
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นกระแส	4
รูปที่ 1.3 ปრაกฏการณ์ไมสเนอร์	6
รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	6
รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	7
รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2	8-9
รูปที่ 1.7 รอยต่อทะเลระหว่างขอบเขตของเกรน	10
รูปที่ 2.2 ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	12
รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	13
รูปที่ 2.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก	14
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ	15
รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O	17
รูปที่ 2.9 แบบจำลอง โครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	17
รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	19
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	19
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	21
รูปที่ 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ	22
รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	23
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	23
รูปที่ 3.9 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์	26
รูปที่ 3.10 ซึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง	27
รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า	27
รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	28
รูปที่ 3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	29
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $900\text{ }^{\circ}\text{C}$	31
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $920\text{ }^{\circ}\text{C}$	32
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $940\text{ }^{\circ}\text{C}$	32
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $960\text{ }^{\circ}\text{C}$	33
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ	33
รูปที่ 4.6 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือ ด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ	37
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้า $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือ ของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ กำลังขยาย 4,000 เท่า	38

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด	21
ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Sintering และอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: Ag ค่าต่างๆ	34
ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่สนามแม่เหล็กภายนอก และอัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: Ag ค่าต่างๆ	35
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อัตราส่วน $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

วันที่ 18 มีนาคม ค.ศ.1987 ณ ห้องจัดค้นบอลรูม โรงแรมนิวยอร์กฮิลตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา นักฟิสิกส์ นักข่าว และผู้สนใจงานด้านฟิสิกส์ จำนวนมากถึง 3,800 คน ได้ไปเข้าร่วมประชุมงานสมาคมนักฟิสิกส์อเมริกัน ในสาขาคอนเดนส์แมตเตอร์ฟิสิกส์ เป็นเรื่องที่ตื่นเต้นที่สุดในรอบหลายทศวรรษที่ผ่านมา นั่นคือ การรายงานผลการค้นพบ "ซูเปอร์คอนดักเตอร์ อุณหภูมิสูง" (High - Temperature Superconductor)

นับแต่นั้นมา ข่าวคราวเกี่ยวกับเรื่อง "ซูเปอร์คอนดักเตอร์" หรือ ที่คนไทย เรียกกันว่า "ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด" นั้นเป็นที่เรียกรวาทกันมากทั่วโลก และในขณะนี้ ก็กำลังมีการแข่งขันกันอย่างมาก เพื่อช่วงชิงตลาดผลิตภัณฑ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่ว่าจะเป็น สหรัฐ, ญี่ปุ่น หรือ จีน

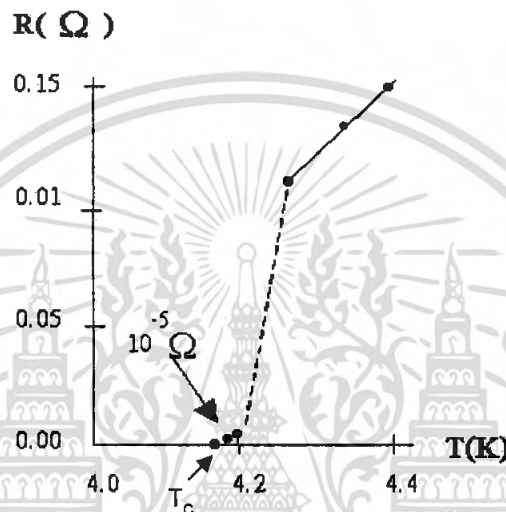
เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกำลังจะเข้ามามีบทบาทในวงการไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น เพราะเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ได้ประสบความสำเร็จในการทำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใช้งานได้ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า จะช่วยลดต้นทุนในการใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้และทำให้แพร่หลายมากขึ้นรวมทั้งคุ้มกับการทำเพื่อการค้า

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น แต่ก่อนรู้จักกันในสภาพของสารตัวนำจำพวกโลหะ ซึ่งจะปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยไม่สูญเสียความร้อน และไม่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ก็เฉพาะเมื่อสารตัวนำนั้นอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำมากๆ ชนิดที่เรียกว่า ดิจิลบ 273 องศาเซลเซียส หรือลบ 460 องศาฟาเรนไฮด์ หรือที่เรียกกันว่า ศูนย์องศาสัมบูรณ์หรือศูนย์องศาเคลวิน ซึ่งถือกันว่าเป็นอุณหภูมิที่ปราศจากความร้อนโดยสิ้นเชิง

เมื่อสารตัวนำโลหะ อยู่ในสภาพแช่แข็งที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์นี้ มันจะสูญเสียความต้านทานทางไฟฟ้าทั้งหมด และเกิดปรากฏการณ์ "ซูเปอร์คอนดักติวิตี" หรือ "การนำไฟฟ้ายิ่งยวด" ซึ่งในสภาพการนำไฟฟ้าดังกล่าวนี้ สามารถนำไฟฟ้าโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งนั่นหมายถึงว่า หากนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปทำสายไฟฟ้าแทนลวดทองแดง ก็จะนำไฟฟ้าได้ดีโดยไม่ต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้าช่วยเลย หรือถ้านำไป พันมอเตอร์ ก็จะได้มอเตอร์ขนาดเล็กลงกว่าที่ใช้ในปัจจุบันเป็นอย่างมากทีเดียวหรือพูดง่าย ๆ ก็คือตัวนำชนิดนี้ สามารถปฏิวัติโลกอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ไปทั้งหมดได้เลย

1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1911 [1] โดยนาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (Mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature, T_c)



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นก็ยังมีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด 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 เนื่องจากสามารถที่จะใช้ในไฮโดรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย

C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งไนโตรเจนเหลวนี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่ายกว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical Values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c)

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุนั้นๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ $\frac{1}{4} T_c$ 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)

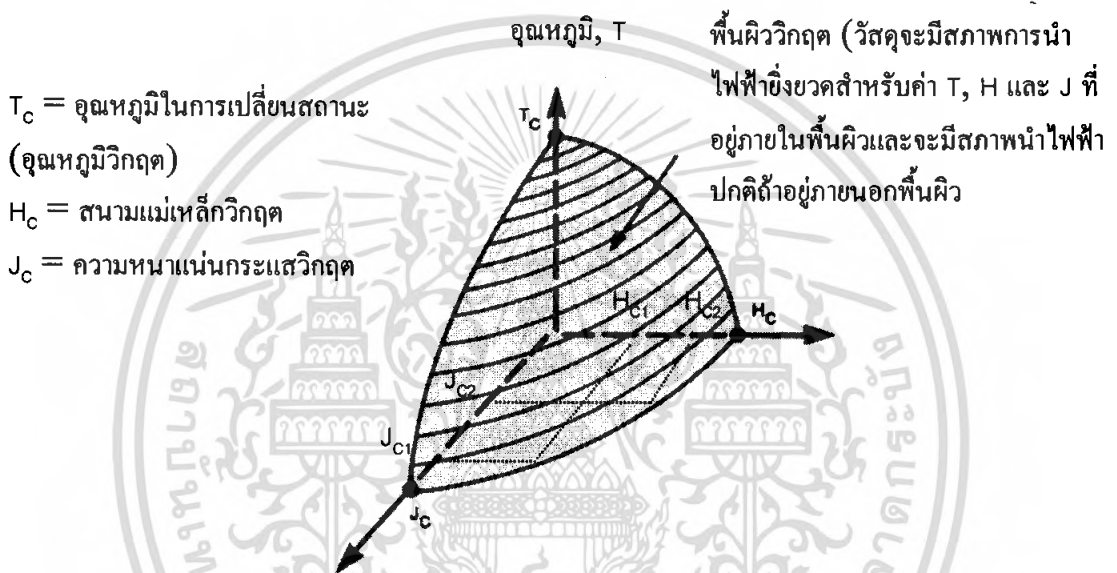
เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c) หรือสามารถวัดได้ในรูปของ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Flux Density : B_c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: J_c)

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

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



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไปอัสให้กับชิ้นสาร 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) และ ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามักเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กกล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 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 $B = 0$

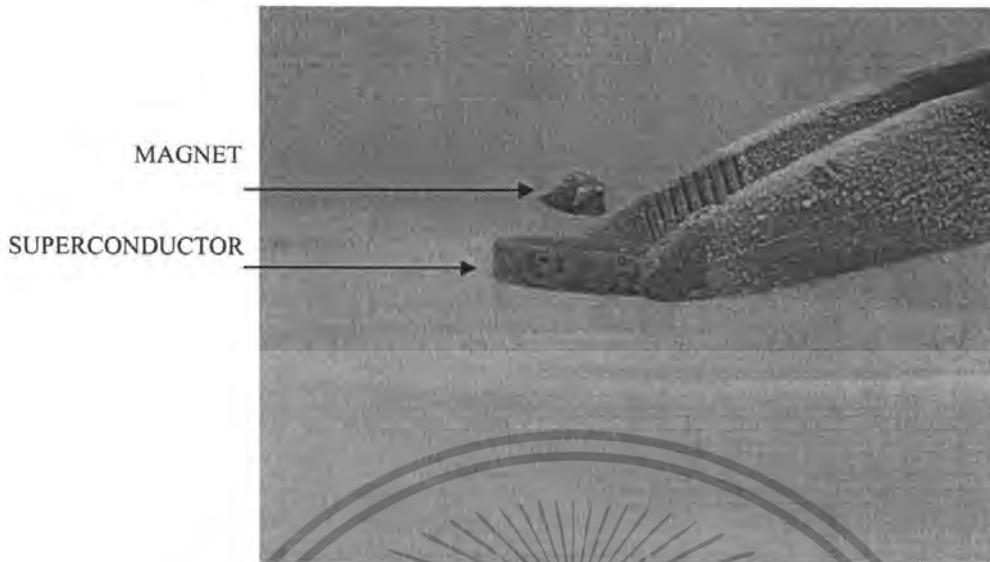
ทำให้

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

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

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

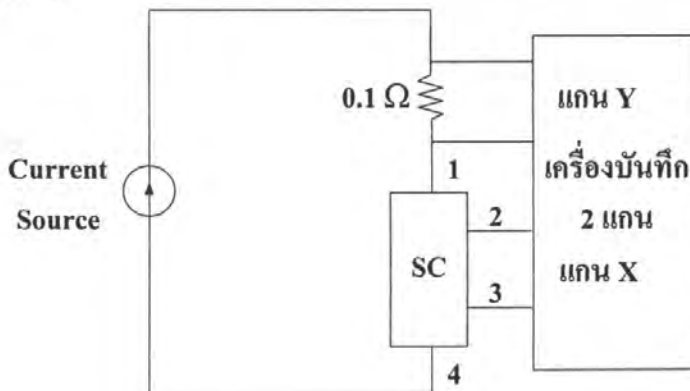
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์

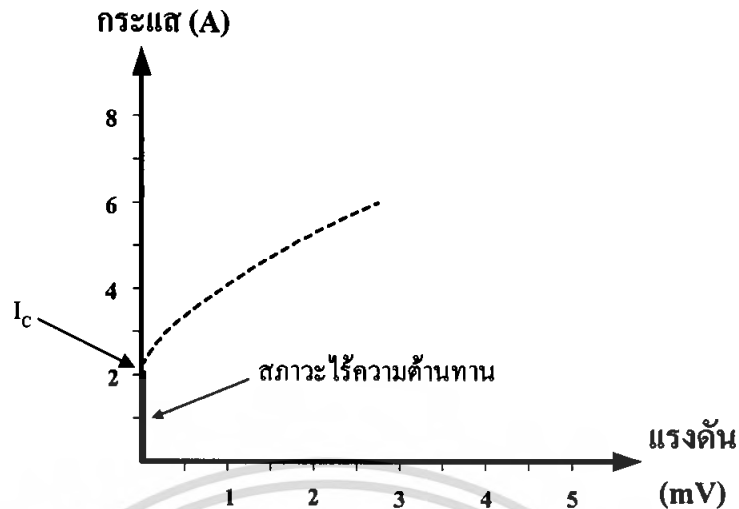
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

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



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 ปปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วนำไฟฟ้าที่ยาวจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ($I_c = 2 \text{ A.}$) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมขั้วนำหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วนำเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน y นั่นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยาวได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยาวด้วยสนามแม่เหล็ก

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

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

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

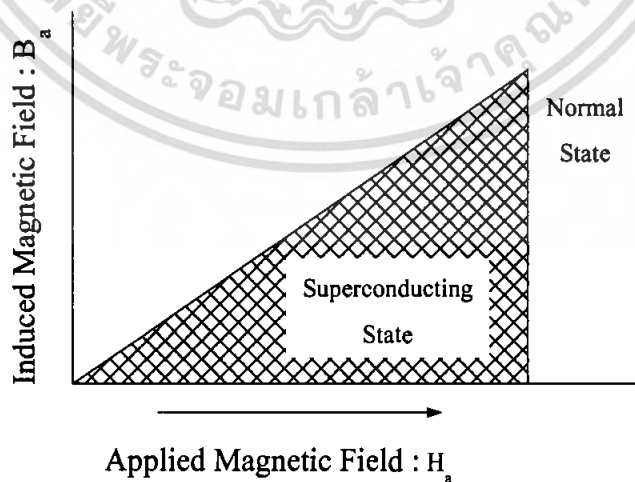
$$H_C(T) = H_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

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

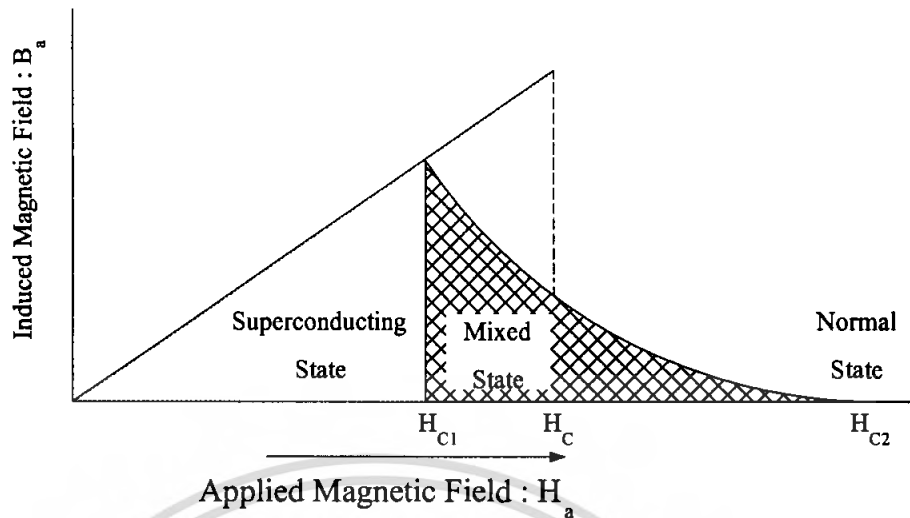
1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

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

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

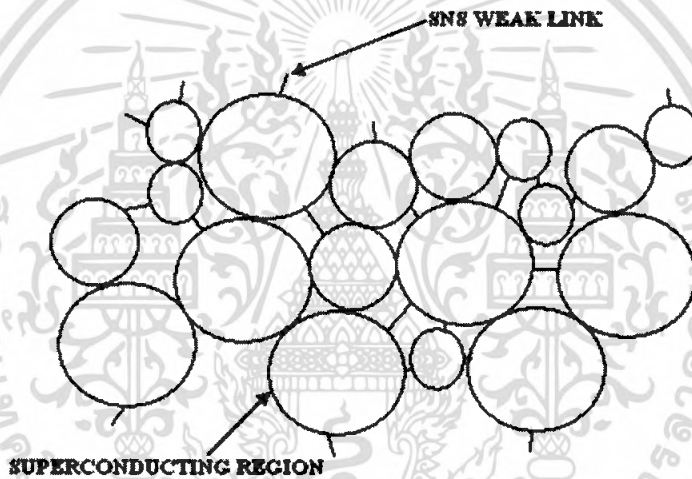
ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต (H_C) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมสเนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก H_{C1} หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า H_{C2} สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

1.6 ขอบเขตเกรนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีขอบเขตเกรนแตกต่างกัน วัสดุเซรามิกรูปแบบของบัลค์ โครงสร้างของเกรนจะไม่เรียงตัวในทิศทางเดียว เมื่อเทียบกับในวัสดุลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มซึ่งมีความเป็นระเบียบมากกว่า ถ้าขอบเขตของเกรนในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเรียงตัวไม่เป็นทิศทางเดียวกันจะทำให้การนำไฟฟ้าต่ำ และเมื่อเม็ดเกรนเรียงตัวผิดปกติรูปมากเส้นทางการนำไฟฟ้า (Conduction Path) จะมีการนำไฟฟ้าลดลง โครงสร้างผลึกที่มีของเขตเกรนพลังงานน้อย (Low Energy Grain Boundaries) จะเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรง และเส้นฟลักซ์แม่เหล็กจะทะลุผ่านได้ยาก ทำให้ความหนาแน่นของกระแสวิกฤตลดลงน้อยเมื่อถูกฟลักซ์แม่เหล็กทะลุผ่าน ชั้นสารชนิดบัลค์มีข้อบกพร่องแบบทางระนาบ(Planar defect)

รอยต่อโจเซฟสันระหว่างขอบเกรน (Intergrain Josephson Junction) หรือ SNS Weak Link ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 1.7 รอยต่อทะเลระหว่างขอบเขตของเกรน

ปรากฏการณ์โจเซฟสันสามารถเกิดได้จากการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงเพียงพอสำหรับเฟส ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในแต่ละด้าน โดยหลักการของปรากฏการณ์โจเซฟสัน เกิดจากการซ้อนทับ ของฟังก์ชันคลื่นตัวนำไฟฟ้าทั้งสองด้าน โดยมีคู่อิเล็กตรอนเป็นตัวพาหะนำกระแสซึ่งเป็นปรากฏการณ์ ทางควอนตัม ดังนั้นปรากฏการณ์โจเซฟสัน สามารถทำให้เข้าใจถึงการ Transition ของตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดหรือการจัดเรียงตัวของสปินในสารเฟอร์โร และที่อุณหภูมิซินเทอร์ริงสามารถทำให้ โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น

ได้เคยมีการศึกษาผลของการเจือ Ag ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO ที่มีต่อคุณสมบัติทางจุลภาคและคุณสมบัติ การนำไฟฟ้ายิ่งยวดกันอย่างกว้างขวาง โดยมุ่งความสนใจไปยัง Ag ที่ไปช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของ YBCO ข้อดีที่ได้จากการเจือ Ag นั้นเกี่ยวกับการไปเพิ่ม ความหนาแน่นกระแสและขนาดของเกรน โดยทั่วไปนั้นเชื่อกันว่า Ag จะแพร่เข้าไประหว่าง Grain Boundary (ขอบเขตของเกรน) กับโลหะ จากกระบวนการทางความร้อน และยังเป็นที่น่าเชื่อถือว่า จะไปช่วยให้มีการ Interconnections ระหว่างเกรนมากขึ้น ในส่วนของ Weak Link ในโครงสร้างนั้นจะลดลงได้ จากการปรับปรุง Interconnections และ Pinning Center ซึ่งจะไปช่วยให้ กระแสวิกฤตมีค่าสูงขึ้น Ag จะไปปรับปรุงการจัดเรียงตัวของเกรน และ ออกซิเจน จะแพร่เข้าไปที่เฟส 1-2-3 นอกจากนี้ยังเคยมีการศึกษา การเจือ Ag ที่กระบวนการต่างๆ เช่น ได้ทำการศึกษาโดย Menzodoza et al สามารถเพิ่ม กระแสวิกฤต ในส่วนการศึกษาเกี่ยวกับ ขอบเขตเกรนและการเพิ่มขึ้นของ กระแสวิกฤต โดยวิธี Electrochemical นั้นได้มีการศึกษาโดย Matsumoto การปรับปรุงโครงสร้างของเกรนจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของจำนวน Ag ที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่จะไปช่วยเพิ่มขนาดของเกรน ช่วยปรับปรุง เกรน และรูพรุนใน โครงสร้างนั้น จากกระบวนการทางความร้อนของ YBCO ที่จุดหลอมเหลวของ Ag นั้นเอง เคยมีการค้นพบว่า Ag ที่เจือเข้าไปนั้นมีผลต่อ โครงสร้าง Orthorhombic ของ YBCO ด้วยเช่นกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

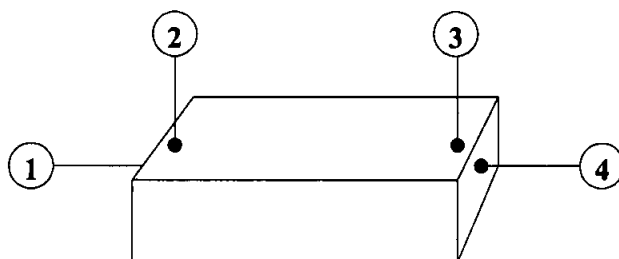
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor: LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor: HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้นลวด เส้นเทป พิล์มหนาและฟิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งให้ค่า J_c ก่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง $10^3 - 10^7 \text{ A/cm}^2$ ทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานทางด้านไฟฟ้ากำลัง และด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างยิ่ง

ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Y:Ba:Cu = 1:2:3) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

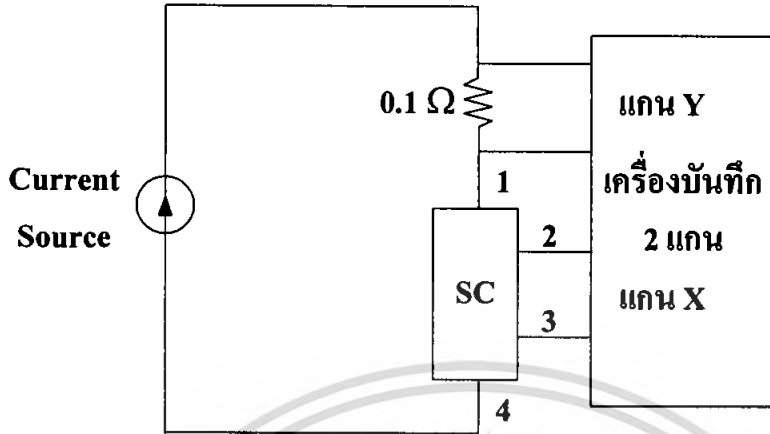
2.2 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

หลังจากที่ได้มีเอกสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.2 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยที่กระแสจะไหลเข้า - ออก จากขั้วที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมขั้วที่ขั้ว 2 และ 3 ในขณะที่ทำการทดลอง ชิ้นสารจะแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกบันทึกลงในเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) ดังรูปที่ 2.4

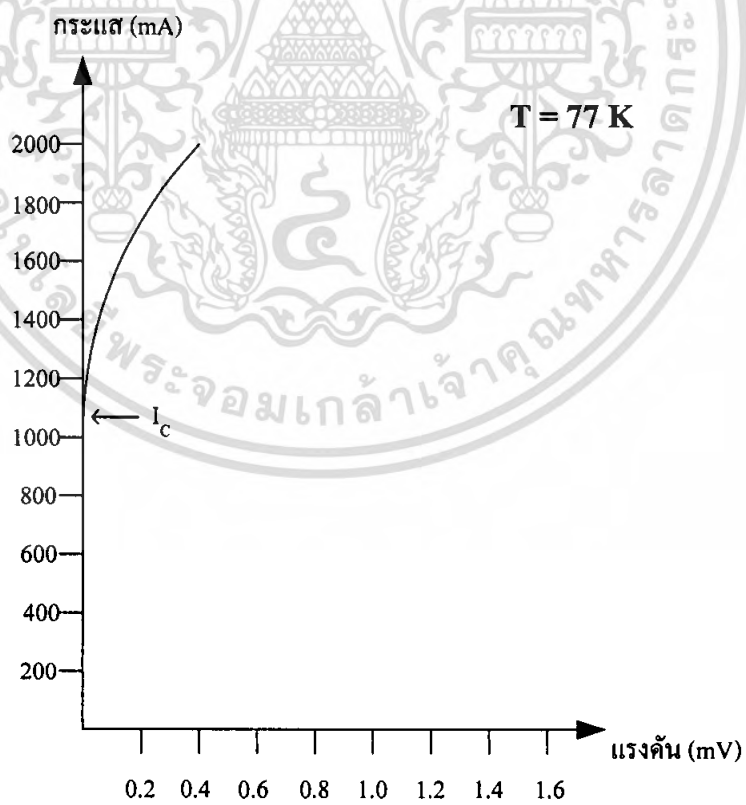


รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

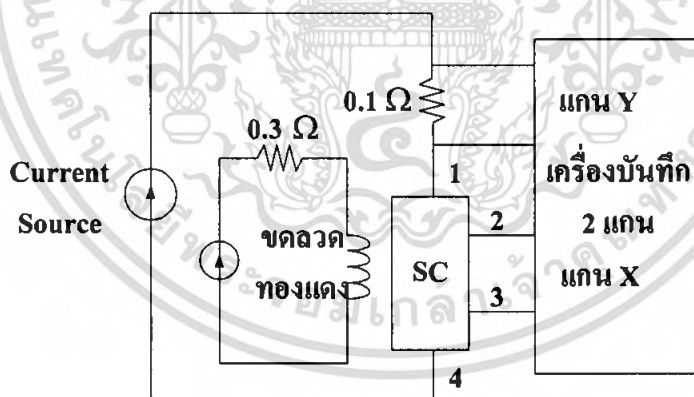
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากระแสวิกฤตของ ซินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 1.08 A ดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A ซินสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมซินสารเกิดขึ้น

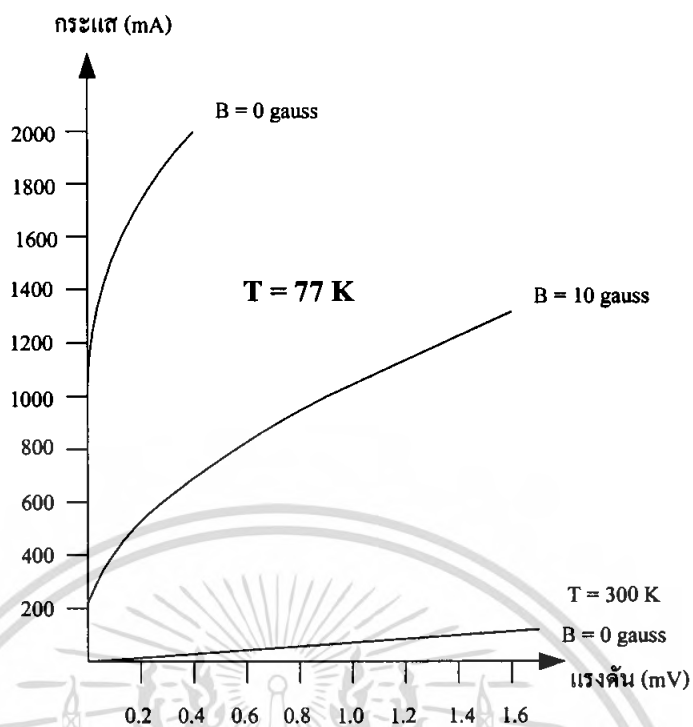
2.3 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในขณะที่ ซินสารกำลังเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสาเหตุที่ทำให้ซินสารเสียสภาพนั้นเกิด จากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับซินสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพ การนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ซินสารเสียสภาพไป จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมซินสารขึ้น ซึ่งในการ ทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อซินสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราจะใช้วงจรดังรูป 2.5 โดย แสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

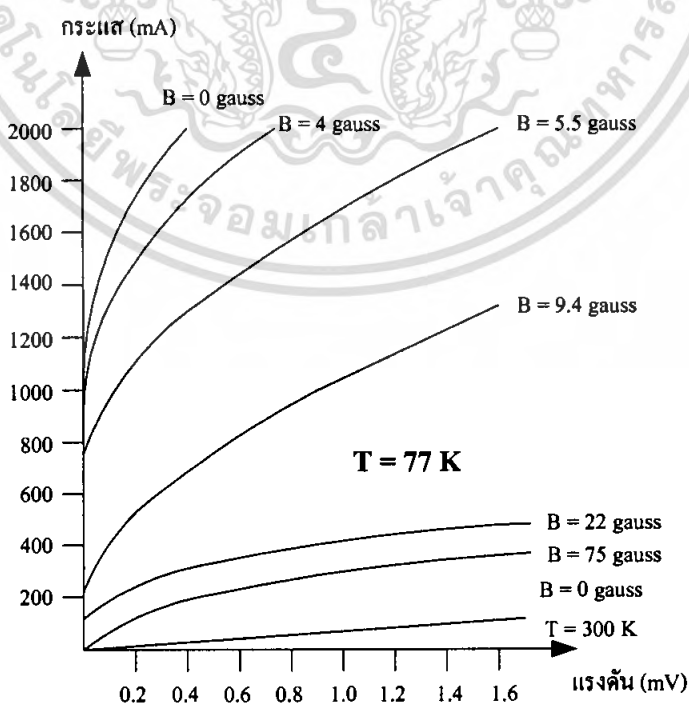
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็น ว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป แต่เมื่อ อยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ 1.08 แอมแปร์ แต่เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามา 10 Gauss จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเหลือ ประมาณ 200 มิลลิแอมป์



รูปที่ 2.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์ของงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่อุณหภูมิ 77 K โดยให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันและผลที่ได้แสดงดังรูป 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

เราสามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าชั้นสารที่อยู่ในอุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าต่างๆเท่านั้น แต่เมื่อชั้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_c = 92 \text{ K}$) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชั้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการป้อนกระแสให้กับชั้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชั้นสารเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชั้นสารจะเสียดสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชั้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชั้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชั้นสาร

จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถยืนยันได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชั้นสาร ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในรูปที่ 2.7 เมื่อให้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงขึ้นปริมาณกระแสวิกฤตจะมีค่าลดต่ำลงตามลำดับ

2.4 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก

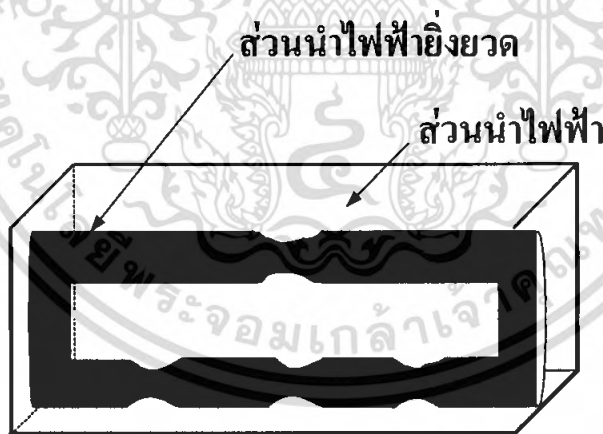
2.4.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ ดังนั้นการที่ชั้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณา

ในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่าย โดยการนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใน



รูปที่ 2.8 แบบจำลอง โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



รูปที่ 2.9 แบบจำลอง โครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

รูปที่ 2.8 มาแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามีจุดคอคเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอคอีก 3 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอคที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.9 นั้นมีอยู่จริงในชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพราะในขณะที่ทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวซิด

ติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการเผาก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้น และกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้น แต่ก็ยังพบว่ามีบางจุดที่เนื้อสารยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา

จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.9 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ชั้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายังขวคั้น ท่อนำไฟฟ้ายังขวคจะเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้าชั้นสารเกิดการเสียดสภาพนำไฟฟ้ายังขวคขึ้น ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายังขวคจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อนำบริเวณที่ขาดก่อนก็คือส่วนของจุดคอด และในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายังขวคชนิด $Y - Ba - Cu - O$

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึก

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี $\theta - 2\theta$ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึก พหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง(Path Difference) จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

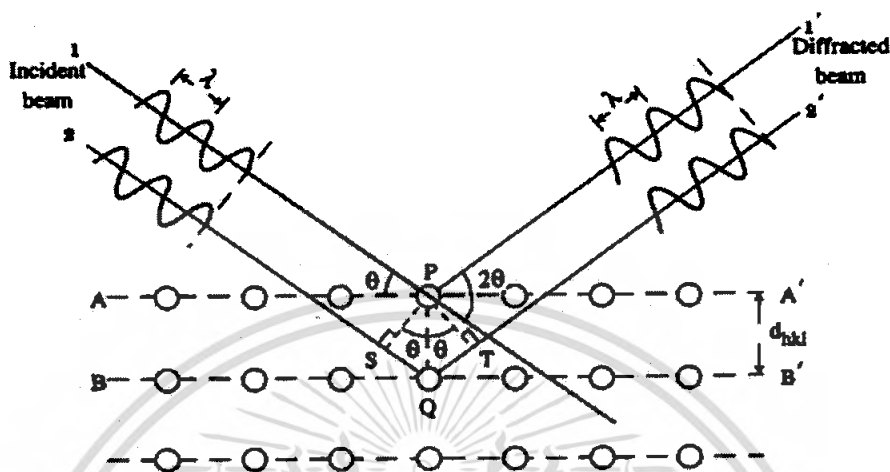
$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

(2.1)

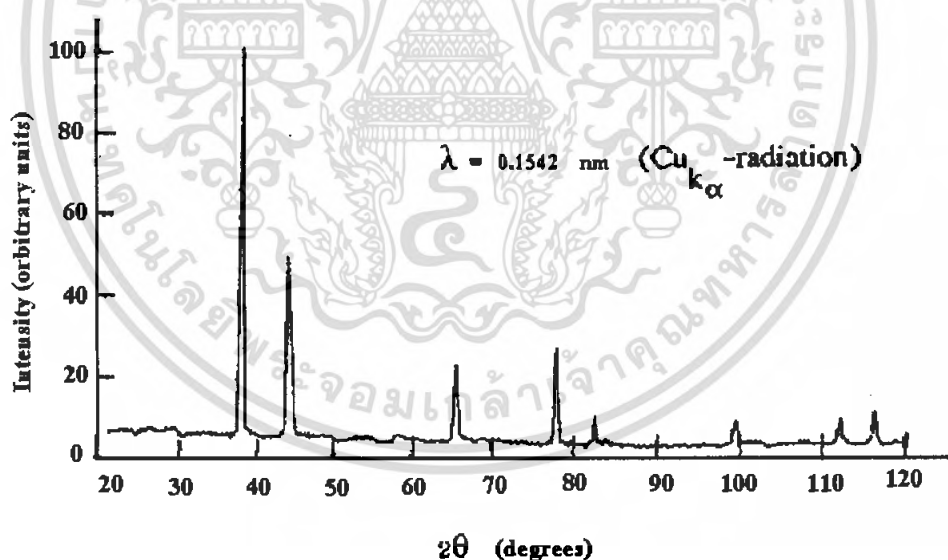
เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ
	θ	คือ	มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบนที่ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg Plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (Diffraction Angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

จากรูปที่ 2.8 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพิก (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้
ค่าคงที่ของโครงผลึก (Lattice Constant) สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
h, k, l คือ ระนาบของผลึก



บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วย อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (AgO_2) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

อสาร	ความบริสุทธิ์ของสาร	มวลโมเลกุล (กรัม)
Y_2O_3	99.99%	225.807 กรัม
$BaCO_3$	99.99%	197.348 กรัม
CuO	99.99%	79.545 กรัม
AgO_2	99.99%	ตาม %wt

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ (Furnance And Temperature Control)

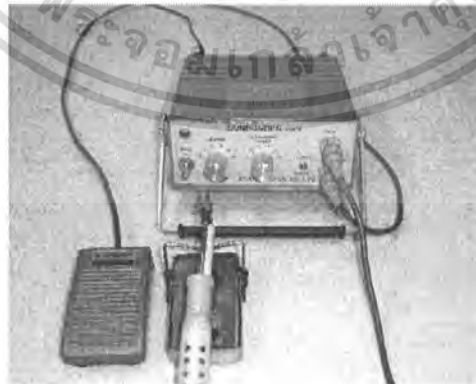
เตาเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นเตาเผาชนิดควบคุมความร้อนที่สามารถให้ความร้อนได้จนถึง 1050 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในส่วนของเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะต่อร่วมกับเตาเผาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค



รูปที่ 3.2 เตาเผาและชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 ชุดบัคกรี้อตราโซนิค

เป็นชุดที่ใช้บัคกรี้อต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่ตะกั่วบัคกรี้อมีส่วนผสมของอินเดียมซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ ในส่วนของชุดบัคกรี้อตราโซนิคจะมีการสั่นของหัวบัคกรี้อ ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างตะกั่วบัคกรี้อและชิ้นสารมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อไอท์มิก

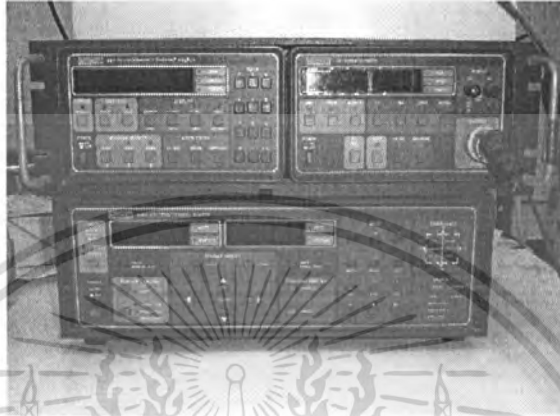


รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรี้อตราโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) ซึ่งมี 2 ชุด คือ ชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-100 mA และชุดที่จ่ายกระแสได้ตั้งแต่ 0-10 A รวมถึงนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt Meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำถึง 10 nV



รูปที่ 3.4 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า



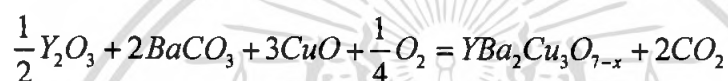
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมผงสารของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: Ag
เริ่มต้นเราต้องเตรียมสารตั้งต้น โดยสารตั้งต้นที่จะใช้จะมี 4 ชนิด ดังนี้

1. Y_2O_3
2. $BaCO_3$
3. CuO
4. Ag_2O

นำสูตรทางเคมีของสารตั้งต้นที่เตรียมไว้มาตั้งสมการ แล้วทำการดุลสมการ เพื่อหาค่าของสารแต่ละชนิดในการทำการทดลอง โดยจากการดุลจะได้ตั้งสมการ



จากสมการจะได้ดังนี้

1 โมล มี $Y_2O_3 = 225.807$ g/mole	จากสมการ Y_2O_3 $\frac{1}{2}$ โมล	ต้องใช้ 112.903 g/mole
1 โมล มี $BaCO_3 = 197.349$ g/mole	จากสมการ $BaCO_3$ 2 โมล	ต้องใช้ 394.696 g/mole
1 โมล มี $CuO = 79.545$ g/mole	จากสมการ CuO 3 โมล	ต้องใช้ 238.635 g/mole

* มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด = 746.2345 g.

ถ้าใช้สารตั้งต้นทั้งหมด 5 g. ต้องคำนวณหาสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

ก. จากสมการสารตั้งต้น 746.2345 g. มี Y_2O_3 112.9035 g.

ถ้าใช้ 36 g. มี Y_2O_3 5.4674 g.

ทำนองเดียวกันจะได้ $BaCO_3$ 19.1136 g.

CuO 11.5561 g.

ข. กำหนดให้ Ag เป็นอะตอมของสารเจือ โดยมี Ag_2O เป็นสารตั้งต้น

ทำการทดลองให้ % ของสารเจือ (%wt) = 0, 5, 10, 15 %wt

จาก
$$\%wt = \frac{Ag_2O}{Ag_2O + YBCO} \times 100$$

จะได้น้ำหนัก Ag_2O ที่ใช้ =
$$\left[\frac{YBCO}{\frac{100}{\%wt} - 1} \right]$$

จะได้ 0 %wt ใช้ Ag_2O = 0 g.

5 %wt ใช้ Ag_2O = 0.078997 g.

10 %wt ใช้ Ag_2O = 0.166667 g.

15 %wt ใช้ Ag_2O = 0.264705 g.

3.3 การวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$

3.3.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)

หัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination (900 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ Sintering (920 , 940 , 960 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$ (0 , 5 , 10 , 15 %wt) มาทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างมาลดอุณหภูมิลงโดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว วัฏระยะการลอยตัวของปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ บันทึกผล

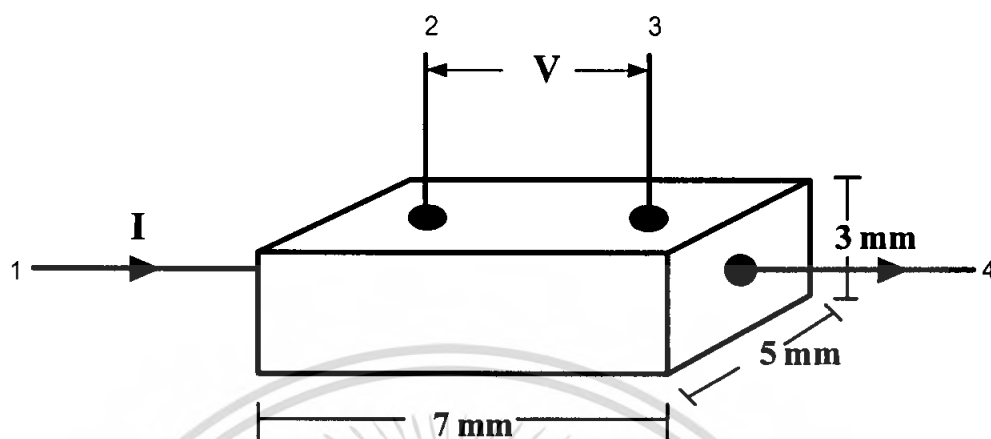


รูปที่ 3.9 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

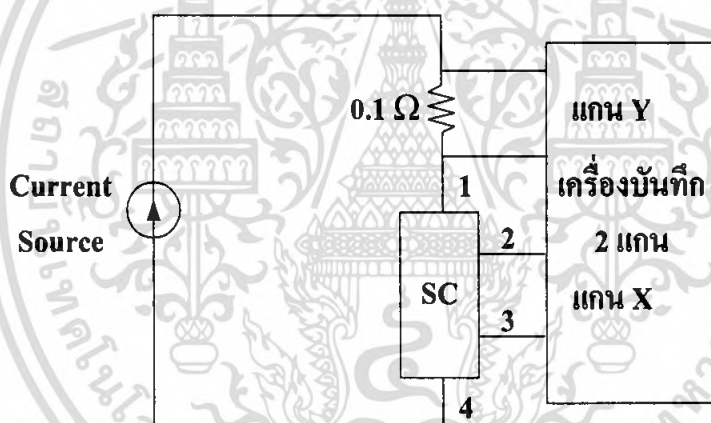
3.3.2 การวัดค่ากระแสวิกฤต

ต่อไปจะเป็นการทดลองวัดค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยใช้วงจรดังรูป 3.11 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) ทำการจ่ายกระแสผ่านตัวต้านทาน 0.1Ω ไปยังชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้เครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) สำหรับข้อ 2-3 นั้นจะเป็นข้อที่ใช้วัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารซึ่งต่อเข้ากับแกน X ของเครื่องบันทึกสองแกน ส่วนแกน Y จะใช้สำหรับวัดปริมาณกระแสที่ป้อนให้กับชิ้นสาร โดยจะวัดในรูปของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน 0.1Ω จากนั้นจึงนำมาคิดในรูปของกระแสอีกครั้งหนึ่ง

สำหรับเม็คสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขวดก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะต้องผ่านการตัดแต่งเม็คสารให้มีรูปทรงดังรูป 3.10 และในการทดลองชิ้นสารจะอยู่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (93 เคลวิน)



รูปที่ 3.10 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังขวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 3.11 วงจรที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำ

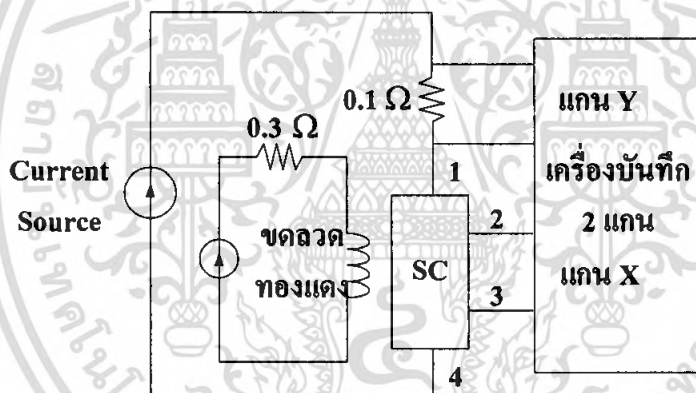
ไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$

ในการทดลองมีขั้นตอนดังนี้

1) นำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 3.12 เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ในไนโตรเจนเหลวในขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย ($B = 0 \text{ G}$) บันทึกผลการทดลอง

2) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า บันทึกผลการทดลอง

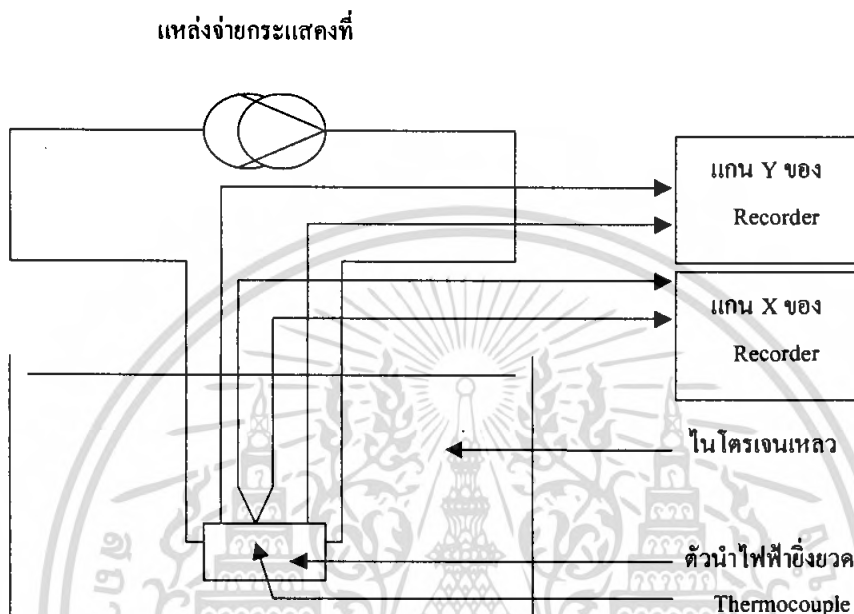
3) ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กแก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้น จนค่ากระแสวิกฤตเป็นศูนย์ โดยที่สนามแม่เหล็กแต่ละค่าจะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.12 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

3.5 การวัดอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x} : Ag$

ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตนั้นค่าอุณหภูมิวิกฤตเป็นสมบัติเฉพาะของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิด ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการศึกษาศาสตร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตจะใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ในการวัดนี้จะนำชิ้นสารมาปรับแต่งแล้วบัดกรีเป็นแบบ Four-Point Probe โดยขั้วที่ 1 และ 4 ได้รับการป้อนกระแสค่าหนึ่งจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนในขั้ว 2 และ 3 นั้นถูกต่อเข้าแกน Y เพื่อแสดงค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ขณะที่ทำการลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับชิ้นสาร ส่วนเทอร์โมคัปเปิลถูกวางให้สัมผัสกับผิวของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยสัญญาณ ซึ่งแรงดันจะต่อเข้าที่แกน X จากนั้นนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและเทอร์โมคัปเปิล

ค่อย ๆ จุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องลงไปยังอุณหภูมิที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว

เมื่อชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารค่าหนึ่งเหมือนเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วๆ ไป มีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง แต่เมื่อนำชิ้นสารไปทำการลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิกำหนึ่งแล้วค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะหมดไป (ความต้านทานเป็นศูนย์) หรือชิ้นสารนั้นเกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั้นจะเรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต้องมีอุณหภูมิวิกฤตสูง ๆ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเอาเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการสร้างที่อุณหภูมิ Calcination (900 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิ Sintering (920 , 940 , 960 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$ (0 , 5 , 10 , 15 %wt) ทดลองวัดอุณหภูมิวิกฤต โดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.13 บันทึกผล

3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึก

เราอาจตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก รูปแบบการเลี้ยวเบนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผงผลึก [Powder Diffraction File (PDF)] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ ซึ่งได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือหรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับการอ้างอิง

บัตรข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้ คือ

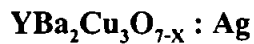
1. เซตและหมายเลขไฟล์ (Set And File Number)
2. พีคที่มีความเข้มมากที่สุด 3 ลำดับแรก (Three Strongest Lines)
3. พีคที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (Lowest-Angle Line)
4. สูตรเคมีและชื่อสาร (Chemical Formula And Name Of Substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีที่ใช้ (Data On Diffraction Method Used) เช่น แหล่งกำเนิด เอ็กซ์เรย์ และฟิลเตอร์ เป็นต้น
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (Crystallographic Data) เช่น รูปร่างผลึกและขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่น ๆ (Optical And Other Data)
8. ข้อมูลของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ (Data Of Specimen)
9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ (Diffraction Pattern) จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I₁) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพีคที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก (hkl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

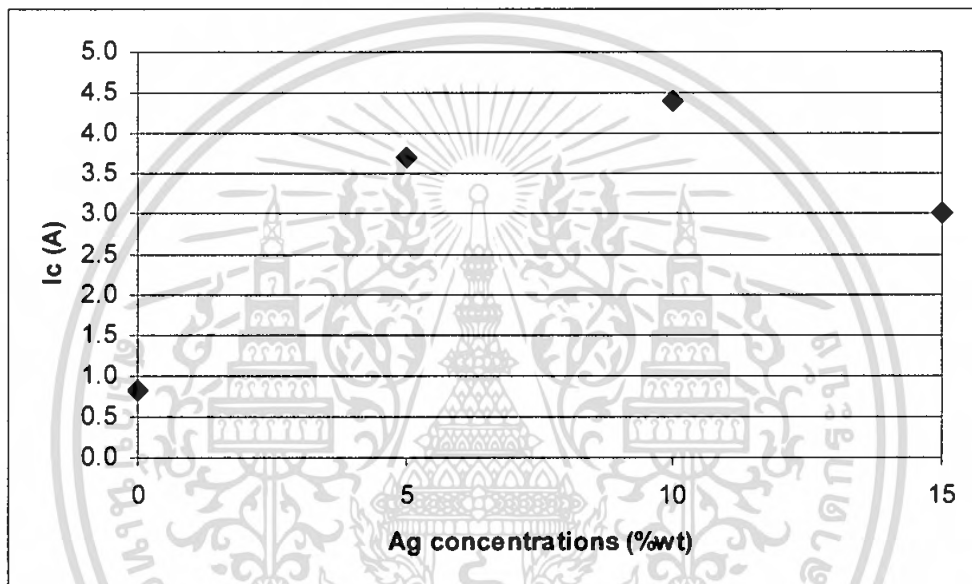
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

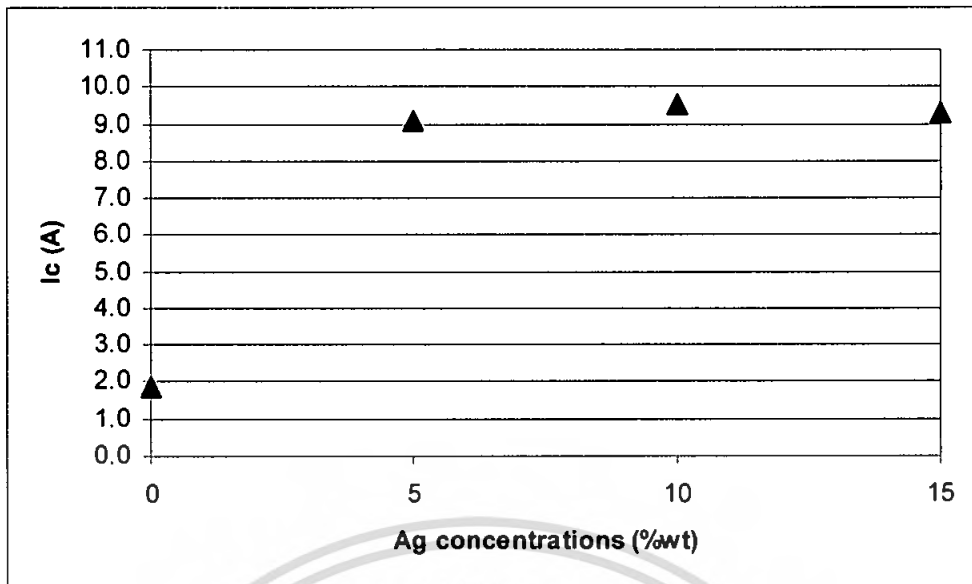
4.1 ผลของอุณหภูมิ Sintering ที่มีผลต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด



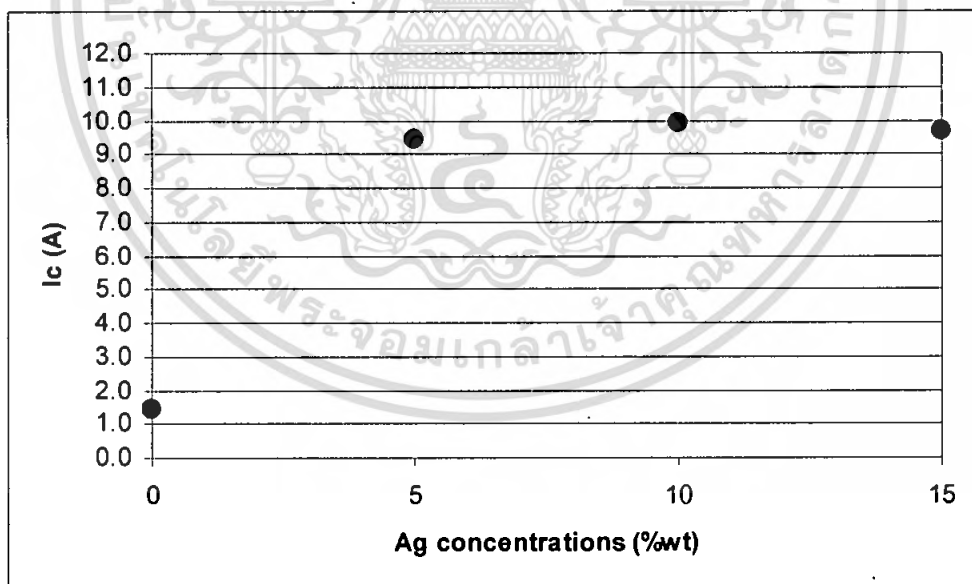
หลังจากที่ได้เม็ดสารที่ผ่านกระบวนการสร้างแล้ว ต่อไปจะเป็นการวัดค่ากระแสวิกฤต ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 - 4.5



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering 900°C

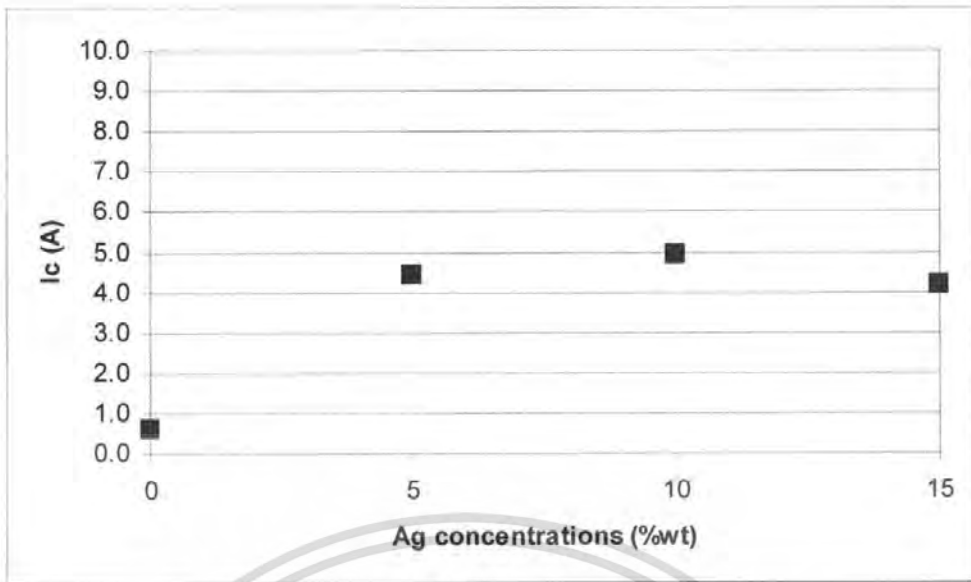


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $920\text{ }^{\circ}\text{C}$

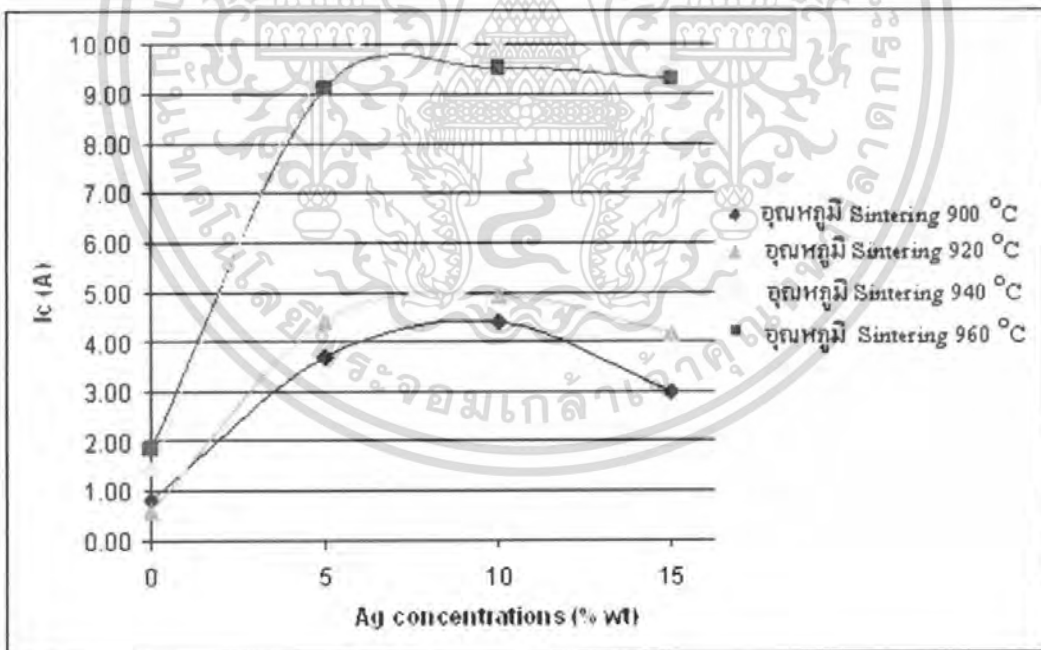


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $940\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $960\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตและอัตราส่วนผสม $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.1-4.4 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสวิกฤต ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ Sintering ที่ใช้ในการเผาและอัตราส่วนผสม Ag มีผลต่อค่ากระแสวิกฤต ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่อุณหภูมิ Sintering และอัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$ ค่าต่างๆ

ความเข้มข้น ของ Ag (wt%)	กระแสวิกฤต (I_c) ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ (A)			
	900 °C	920 °C	940 °C	960 °C
0	0.83	1.86	1.43	0.6
5	3.7	9.12	9.45	4.43
10	4.4	9.51	9.94	4.93
15	3	9.31	9.67	4.18

4.2 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด

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

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กภายนอกมีผลต่อกระแสวิกฤต เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนให้กับชิ้นสารมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่ากระแสวิกฤตมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกไปทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวดทำให้เสียสภาพได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงค่ากระแสวงกุดที่สนามแม่เหล็กภายนอกและอัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$ ค่าต่าง

อุณหภูมิ Sintering (°C)	%wt	ค่ากระแสวงกุด (mA) เมื่อป้อน สนามแม่เหล็กภายนอก (mT) ค่าต่างๆ				
		0mT	0.5mT	1mT	1.5mT	2mT
900	0	0.83	0.57	0.3	0.1	0
900	5	3.7	2.32	2.12	1.34	0.54
900	10	4.4	3.03	1.94	1.32	1.02
900	15	3	1.56	0.32	0.42	0.1
920	0	1.86	0.83	0.43	0.2	0
920	5	9.1	8.3	7.1	6.7	5.03
920	10	9.5	8	7.25	7.14	5.12
920	15	9.3	9	8.98	7.77	5.53
940	0	1.43	0.56	0.32	0.13	0
940	5	9.45	9	9	7.6	5.5
940	10	9.94	9.5	9.3	8.4	7.6
940	15	9.67	9.3	8.3	7.1	6.9
960	0	0.6	0.1	0	0	0
960	5	4.43	3.14	3.59	2.8	1.36
960	5	4.93	3.53	3.37	3.23	2.27
960	4	4.18	2.76	2.58	1.46	1.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Ag}$

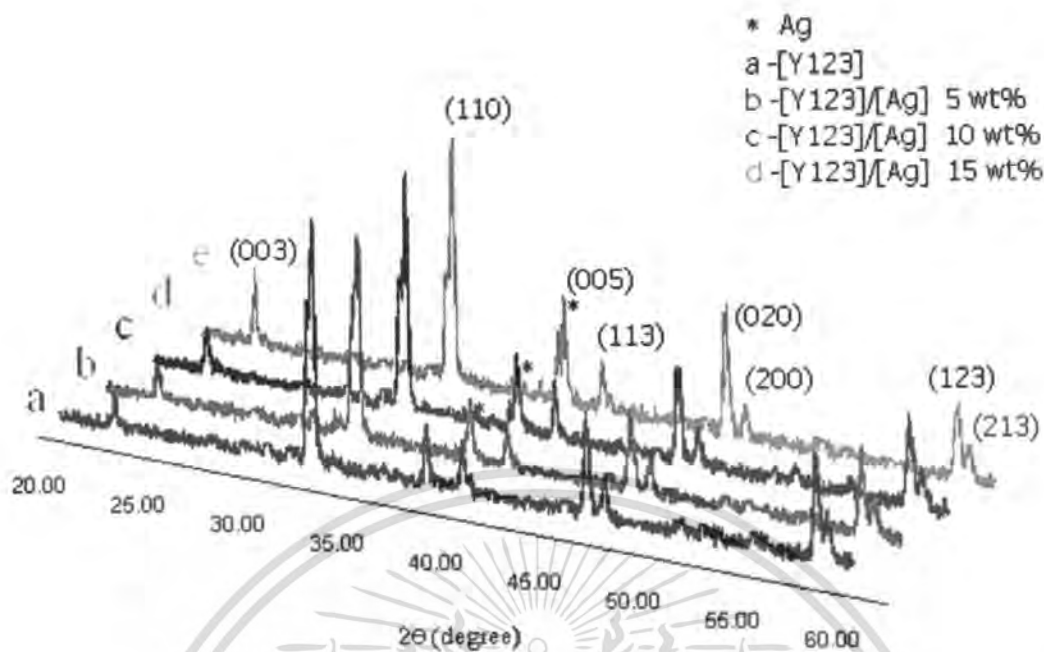
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน Ag 10 wt% ซึ่งมีค่ากระแสวิกฤตสูงที่สุด เท่ากับ 9.94 A ค่าอุณหภูมิวิกฤตจะมีค่าประมาณ 94 K

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตที่อัตราส่วน $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ

ความเข้มข้น ของ Ag (wt%)	อุณหภูมิวิกฤต : Tc (K) ที่อุณหภูมิ Sintering ต่างๆ			
	900 °C	920 °C	940 °C	960 °C
0	91	91.4	91	91
5	91.7	94	94	93
10	92	94.1	94.2	93.5
15	92	94	94.2	93

4.4 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

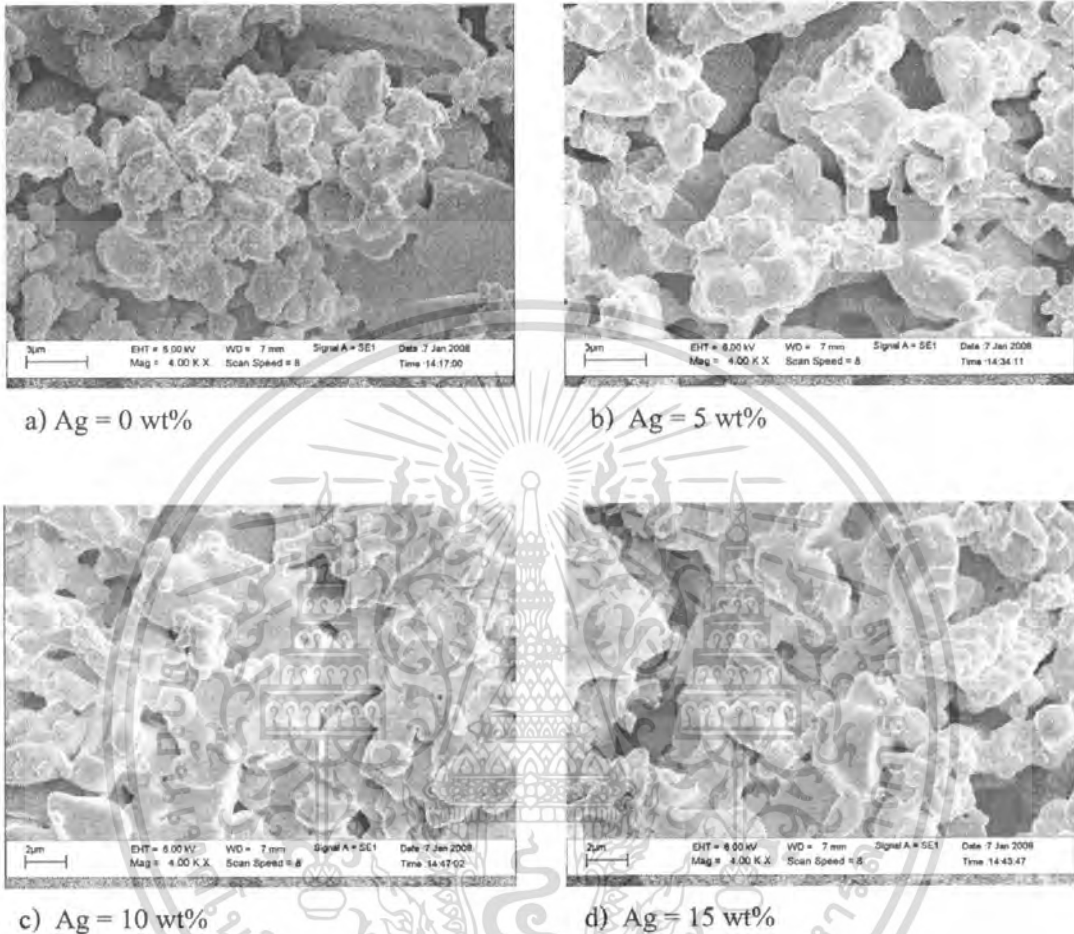
เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึก $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆและต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกของชิ้นสารว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเราจึงนำชิ้นสารที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อดูลักษณะของพิกที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพิกมาตรฐาน



รูปที่ 4.6 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีก (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น YBCO จากผลการวิเคราะห์จะพบพีกหลัก 3 พีก คือ (003), (110) และ (020) ในส่วนของ Ag นั้น ปรากฏอยู่ที่พีก (005)

4.5 ผลการศึกษาลักษณะ ผิวหน้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: Ag ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้า $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่ทำการเจือด้วยอะตอมสารเจือของ Ag ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิ Sintering $940^{\circ}C$ กำลังขยาย 4,000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงโครงสร้างพื้นผิวของ YBCO ที่เจือและไม่เจือ Ag แสดงโดย SEM ให้เห็นถึงโครงสร้างเกรนและรูพรุนของชั้นสารของชั้นสาร YBCO ที่อัดด้วยความดัน 1.2 ton/cm^2 จะเห็นได้ว่าขนาดของเกรนและการจัดเรียงตัวนั้นจะได้รับการปรับปรุงเมื่อเติม Ag ซึ่งความเข้มข้นของ Ag ที่เพิ่มขึ้นที่ 10wt% อุณหภูมิ Sintering $940^{\circ}C$ (รูปที่ 4.7c) ขนาดของเกรนจะใหญ่และไม่มีรูพรุนในชั้นสาร ชั้นสาร 10wt% จะมีความหนาแน่นของ bulk และเกรนมีการเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Ag พบว่าค่า wt% มากกว่า 10wt% โครงสร้างเกิดรูพรุนมากกว่าชั้นสารที่ไม่ได้ทำการเจือ Ag ขนาดของเกรนจะลดลง ดังนั้นเมื่อทำการเจือ Ag มากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเสื่อมลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของ Ag ที่เจือในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO เซรามิก สรุปได้ว่า โครงสร้างและคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อเราทำการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนของ Ag ที่ 10 wt% ที่อุณหภูมิ Sintering 940 องศาเซลเซียส I_c ในชั้นสาร จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6 % ที่ 77K และ $B = 0$ mT จากสนามแม่เหล็กและ I_c พบว่า I_c ที่ค่าสนามแม่เหล็กต่างๆ จะลดลงเมื่อ I_c เพิ่มขึ้น อะตอมสารเจือ Ag สามารถปรับปรุงเกรนและการจัดเรียงตัวของเกรน และจุดคอด ในกระบวนการทางความร้อนของ YBCO เซรามิกของเหลว Ag จะเข้าไปในรูพรุนของโครงสร้างและไปปรับปรุงโครงสร้างที่แตกร้าว อย่างไรก็ตามเมื่อ Ag เพิ่มขึ้นมากกว่า 15 wt% แล้ว โครงสร้างและคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของชั้นสารแย่งลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ Ag จะไปขัดขวางการโตของเกรน ผลที่สุดคือเกรนจะเล็กลงและมีการจัดเรียงตัวอย่างไร้รูปแบบ กล่าวได้ว่าชั้นสารมีพฤติกรรมที่แย่งเมื่อนำไปประยุกต์กับกระแสไฟฟ้าค่าสูงๆ