

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดYBCO

YBCO SUPERCONDUCTOR THICK FILM MAGNETIC SENSOR



เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 47926
วัน, เดือน, ปี..... 24 ส.ค. 2546

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-661-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

YBCO SUPERCONDUCTOR THICK FILM MAGNETIC SENSOR



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

2003

ISBN 974-324-661-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO
นักศึกษา	นายเดชา ยศศักดิ์ศรี
รหัสประจำตัว	41061130
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสูตร ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO รวมถึงการศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอกของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และคุณสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ

ในการศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอก พบว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบคงที่ และสนามแม่เหล็กแบบสลับได้ โดยสามารถใช้วัดสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ ในช่วง 0.45 - 18 เกาส์ ได้ดีโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และสามารถตอบสนองได้ที่ความถี่ต่ำในช่วง 0 - 800 เฮิรตซ์ ได้เป็นอย่างดี สำหรับในกรณีของการตรวจจับสัญญาณแม่เหล็กแบบสลับ หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ จะให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีลักษณะเรียงสัญญาณแบบเต็มคลื่น ที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าๆ ก่อนการเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก ซึ่งผลทดลองทั้งหมดดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

Thesis Title	YBCO Superconductor Thick Film Magnetic Sensor
Student	Mr. Decha Yossaksri
Student ID	41061130
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

For this thesis, presented the fabrication of YBCO superconductor thick films, including the supplementary study on magnetic field response of YBCO superconductor thick films and study the other properties of superconductor which important to the application is the magnetic sensor.

In study on magnetic field response of superconductor thick films, it is found that superconductor thick films are able to responds with constant magnetic field and A.C. magnetic field. This sensor obtains very high sensitivity to low magnetic field between 0.45-18.0 gauss isotropically as well as its low frequency response of 0-800 Hz. For studied A.C. magnetic field, superconducting magnetic sensor generates output signal of full wave rectification, the explanation can be done by using a macrostructure model of ceramic superconductor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ที่กรุณาให้ความรู้ แนวทางในการแก้ไขปัญหา ความห่วงใย และช่วยสนับสนุนในทุกด้าน ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ เป็นอย่างสูงที่มีความห่วงใยและกรุณาให้ช่วยเหลือต่างๆ ขอขอบคุณ คุณวิสิษฐ์ วงศ์สุทธิธรรม, คุณนพพล สิทธิพล, คุณอภิรัช ฤกษ์รัตน์ และน้อง ๆ ห้องปฏิบัติการสาร คิวนาไฟฟ้ายังขวคทุกท่านที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือตลอด ขอขอบคุณ เพื่อนจาก มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ทำให้มีแรงใจในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่ๆของกระผมทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้ความรักและความห่วงใยและโอกาสในการศึกษาครั้งนี้ ตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
ศัพท์เทคนิค.....	XIV
สัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ประวัติความเป็นมาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	1
1.2 สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2.....	3
1.3 คุณสมบัติที่สำคัญของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	6
1.3.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	6
1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....	7
1.3.3 ปรากฏการณ์ซีสปี.....	7
1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	8
1.4.1 อุณหภูมิกวิกฤต.....	8
1.4.2 กระแสวิกฤต.....	9
1.4.3 สนามแม่เหล็กวิกฤต.....	9
1.5 ปฏิกริยาที่มีผลกับการลดประสิทธิภาพของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิค.....	9
1.6 กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วไป.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	13
2.1 บทนำ.....	13
2.2 การเป็น Perfect Conductivity และ Perfect diamagnetism.....	14
2.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำ.....	18
2.3.1 สนามแม่เหล็กของชิ้นส่วนกระแส.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.3.2	สนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรงและยาว.....	19
2.3.3	สนามแม่เหล็กของลวดที่พันเป็นวงกลม.....	21
2.3.4	สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์.....	23
2.4	คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2.....	25
2.5	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....	26
2.6	คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....	28
2.7	การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็ก.....	29
2.7.1	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์.....	29
2.7.2	หัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	30
2.8	การจำสภาพแม่เหล็ก (memory) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....	30
2.9	หลักการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	31
บทที่ 3	การทดลอง.....	33
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	33
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มหนา.....	34
3.1.3	เตาเผาสารและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	34
3.1.4	ชุดวัดกริโซนิค.....	35
3.1.5	ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	36
3.2	กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	36
3.2.1	การเตรียมผงสาร YBCO	37
3.2.2	การเตรียมแผ่นฐานรอง.....	37
3.2.3	การสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO	38
3.3	การทดลองหาอุณหภูมิการเผาฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	39
3.4	การทดลองตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	41
3.4.1	ปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือจำหน่าย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.4.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	41
3.4.3	คุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	42
3.5	การทดลองผลของขนาดและลวดลายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	43
3.5.1	การทดลองที่ความหนาต่างๆ.....	43
3.5.2	การทดลองที่ความกว้างต่างๆ.....	44
3.5.3	การทดลองที่ความยาวต่างๆ.....	44
3.5.4	การทดลองที่ลวดลายต่างๆ.....	45
3.6	การทดลองผลของทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	46
3.7	การทดลองการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	47
3.8	การทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ.....	48
3.9	การทดลองผลของการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	49
3.10	การทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กของหัวสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบ.....	51
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	52
4.1	ผลการหาอุณหภูมิในการเผาฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	52
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	52
4.2.1	ปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....	52
4.2.2	คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	53
4.2.3	คุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	54
4.3	ผลของขนาดและลวดลายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	54
4.3.1	ผลการทดลองที่ความหนาต่างๆ.....	54
4.3.2	ผลการทดลองที่ความกว้างต่างๆ.....	57
4.3.3	ผลการทดลองที่ความยาวต่างๆ.....	60
4.3.4	ผลการทดลองที่ลวดลายต่างๆ.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.4 ผลของทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	66
4.5 ผลการทดลองการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	68
4.6 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ.....	69
4.7 ผลของการเติมสารเจือซิลเวอร์ออกไซด์ ที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	74
4.7.1 อัตราส่วน โดยอะตอม 0.1.....	75
4.7.2 อัตราส่วน โดยอะตอม 0.2.....	75
4.7.3 อัตราส่วน โดยอะตอม 0.4.....	76
4.8 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ได้ออกแบบ.....	77
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

รูปที่	หน้า
1.1	แผนผังแสดงธาตุที่สามารถเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....2
1.2	แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....3
1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....4
1.4	ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กขณะเกิดปรากฏการณ์ไมสเนอร์.....6
1.5	ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน.....7
1.6	อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....8
1.7	กระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....9
1.8	ลักษณะของเมดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ.....10
2.1	ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....14
2.2	การซึมซาบสนามแม่เหล็กเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....17
2.3	เวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสช่วงหนึ่ง.....18
2.4	สนามแม่เหล็กรอบตัวนำตรงยาว.....20
2.5	สนามแม่เหล็กรอบตัวนำตรงยาว.....21
2.6	สนามแม่เหล็กเกิดจากช่วงยาว dl ของสายไฟพันเป็นวงกลมที่มีกระแส I ผ่าน.....21
2.7	เส้นเหนี่ยวนำรอบลวดพันวงกลม.....23
2.8	เส้นเหนี่ยวนำรอบโซลินอยด์ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า abcd.....24
2.9	กราฟคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิวิกฤต.....25
2.10	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....26
2.11	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกชนิดชั้นรูป.....27
2.12	แบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่ายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....27
2.13	กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน (ก) แบบ bulk (ข) แบบฟิล์มหนา.....27
2.14	กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....28
2.15	กราฟเชิงชี้แสดงค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์กับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ.....29
2.16	กราฟเชิงชี้แสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากระทำ.....30
2.17	กราฟลักษณะกระแสกับแรงดันขณะเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก.....31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์การเตรียมฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	34
3.2 เตาเผาสารและชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	35
3.3 ชุดบัคกรี้อัดตราโซนิค.....	35
3.4 ชุดเครื่องมือวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน.....	36
3.5 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	37
3.6 ลักษณะของแผ่นฐานรองที่เตรียมแล้ว.....	38
3.7 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....	38
3.8 ลักษณะของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก.....	39
3.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิ 870, 900, 930 และ 960°C.....	40
3.10 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดัน.....	41
3.11 ลักษณะการต่อขั้วบัคกรีกับชิ้นสาร.....	42
3.12 ลักษณะวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก.....	42
3.13 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความหนาต่างๆ.....	43
3.14 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความกว้างต่างๆ.....	44
3.15 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าความยาวต่างๆ.....	45
3.16 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ลวดลายต่างๆ.....	46
3.17 การทดลองวัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ.....	47
3.18 วงจรวัดคุณสมบัติการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	47
3.19 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ.....	48
3.20 แผนผังการเตรียมฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์.....	50
3.21 ลักษณะลวดลายของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ออกแบบ.....	51
4.1 ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	53
4.2 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	53
4.3 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าสนามแม่เหล็ก ภายนอกค่าต่างๆ.....	54
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความหนา 0.32 mm ที่สนามแม่เหล็ก ค่าต่างๆ.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความหนา 0.43 mm ที่สนามแม่ภายนอก ค่าต่างๆ.....	55
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความหนา 0.65 mm ที่สนามแม่ภายนอก ค่าต่างๆ.....	56
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความหนาต่างๆ.....	57
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.2 cm ที่สนามแม่ภายนอก ค่าต่างๆ.....	58
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.3 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	58
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.7 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	59
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 1.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	59
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความกว้างค่าต่างๆ.....	60
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 1.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	61
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 2.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	61
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 3.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	62
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 4.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอก ค่าต่างๆ.....	62
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความยาวระหว่างขั้ววัด แรงดันตกคร่อมชิ้นสารค่าต่างๆ.....	63
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 1 ขณะให้สนามแม่ เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	64
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 2 ขณะให้สนามแม่ เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 3 ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ.....	65
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่รูปแบบของลวดลายต่างๆ.....	65
4.22 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$	66
4.23 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับชิ้นสารขนาด $1.2 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$	67
4.24 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับชิ้นสารแบบลวดลาย.....	67
4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับสนามแม่เหล็กเพื่อแสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก.....	68
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 2 V กระแสเบสแควตนา เพฟายงยวด 20 mA.....	70
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 3 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA.....	70
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 5 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA.....	71
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 10 V กระแสเบสแควตนา เพฟายงยวด 20 mA.....	71
4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 50 Hz ขนาดแรงดัน 6 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 1 kHz ขนาดแรงดัน 6 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA.....	73
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 2 kHz ขนาดแรงดัน 7 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA.....	73
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 3 kHz ขนาดแรงดัน 8 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA.....	74
4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของชิ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.1 โดยอะตอม.....	75
4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของชิ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.2 โดยอะตอม.....	75
4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของชิ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.4 โดยอะตอม.....	76
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่การเจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.1, 0.2 และ 0.4 โดยอะตอม.....	76
4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออกแบบ ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ.....	77
4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออกแบบ.....	78
5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 10 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA.....	79

ศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

กระแส

Current

กระแสคงสภาพ

Persistent Current

กระแสตรง

Direct Current

กระแสไบอัส

Biasing Current

กระแสป้องกัน

Shielding Current

กระแสวิกฤต

Critical Current

กระแสสลับ

Alternative Current

กระแสไหลวน

Eddy Current

การลดทอน

Attenuate

การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

Electromagnetic Induction

ขดลวดโซลินอยด์

Solenoid Coil

ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อ

Coupling Strength

ความต่างศักย์

Voltage

ความต้านทานไฟฟ้า

Resistance

ความยาวโคฮีเรนต์

Coherent Length

ความลึกซึมซาบ

Penetration depth

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

Current Density

ความเหนี่ยวนำ

Inductance

คอปเปอร์

Copper

คอปเปอร์ออกไซด์

Copper Oxide

เครื่องกำเนิดสัญญาณ

Function Generator

เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแบบเกาส์

Gauss Meter

เคลวิน

Kelvin

โครงข่าย

Lattice

เซรามิก

Ceramic

เซลเซียส

Celcius

ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์

Perfect Conductor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor
ทฤษฎีทางจุลภาค	Microscopic Theory
ทฤษฎีทางมหภาค	Macroscopic Theory
นอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอน	Normal Conduction Electron
ไนโตรเจนเหลว	Liquid Nitrogen
แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	Macrostructure Model
แบเรียมคาร์บอเนต	Barium Carbonate
ปรากฏการณ์ซิลสบี	Silsbee Effect
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	Meissner Effect
วงจรแม่เหล็ก	Magnetic Circuit
สถานะนำไฟฟ้าปกติ	Normal State
สถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconducting State
สนามแม่เหล็กคงที่	Constant Magnetic Field
สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา	Time Dependent Magnetic Field
สนามแม่เหล็กภายนอก	External Magnetic Field
สนามแม่เหล็กวิกฤต	Critical Magnetic Field
สภาพการเปลี่ยนแปลง	Transition
สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductivity
สภาพความซึมซาบสนามแม่เหล็ก	Magnetic permeability
สภาพความต้านทานคงค้าง	Residual resistivity
สภาพแม่เหล็ก	Magnetization
สภาพไร้ความต้านทาน	Zero resistance
ส่วนคอดภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Weak link
ส่วนตัวนำไฟฟ้าธรรมดา	Normal part
ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	Superconductor part
สารไดอามagnetic	Diamagnetic
เส้นแรงแม่เหล็ก	Magnetic flux
หัววัดสนามแม่เหล็กความไวสูง	High sensitivity magnetic sensor
แหล่งกำเนิดกระแสคงที่	Constant Current source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

แหล่งกำเนิดแรงดัน	Voltage source
แหล่งจ่ายกำลัง	Power supply
ออสซิลโลสโคป	Oscilloscope
อิทเทรียม	Yttrium
อิทเทรียมออกไซด์	Yttrium oxide
อุณหภูมิวิกฤต	Critical temperature
ฮีเลียมเหลว	Liquid helium



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สารละลายที่มีปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.....	11
3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด.....	34
4.1 ลักษณะของฟิล์มหนาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
B	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	Wbm^{-2}
e^*	ประจุไฟฟ้าของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์	q
C	ความจุไฟฟ้า	F
H	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	Wb
H_c	สนามแม่เหล็กวิกฤต	Wb
H_{c1}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบล่าง	Wb
H_{c2}	สนามแม่เหล็กวิกฤตขอบบน	Wb
H_0	สนามแม่เหล็กที่ศูนย์เคลวิน	Wb
I	กระแส	A
I_c	กระแสวิกฤต	A
J_c	ความหนาแน่นของกระแสวิกฤต	Acm^{-2}
J_s	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด	Acm^{-2}
K	ลักษณะของการเชื่อมต่อ	-
L	ขดลวดเหนี่ยวนำ	H
M	ความเข้มข้นของแมกเนโตเซชัน	Wbm^{-2}
m^*	มวลของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์	Kg
n_s	ความหนาแน่นของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์	$/\text{cm}^3$
R	ความต้านทาน	Ω
T_c	อุณหภูมิวิกฤต	K
U	พลังงานของคู่อิเล็กตรอน	J
V_0	แรงดันไบอัสกระแสตรง	V
V_s	ความเร็วของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์	m/s
V_1	แรงดันไบอัสกระแสสลับ	V
χ	สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก	-
δ	ผลต่างระหว่างเฟสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
δ_0	ผลต่างระหว่างเฟสเริ่มต้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
Φ	ฟลักซ์แม่เหล็ก	Wb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Φ_0	ฟลักซ์ควอนตัม	$T \cdot m^2$
λ_L	ความลึกของการซึมซาบสนามแม่เหล็กของลอนดอน	m
μ	ความซึมซาบได้	-
μ_0	ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ	-
μ_r	ความซึมซาบได้สัมพัทธ์	-
θ	เฟสของฟังก์ชันคลื่นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	-
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega \cdot m$
σ	สภาพนำไฟฟ้า	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
ω_L	ความถี่กระแอสลับ	Hz
ξ	ความยาวโคฮีเรนต์	m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

จากการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้สร้างความประหลาดใจให้กับวงการวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมาก จึงทำให้มีความพยายามที่จะนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงนี้ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆมากขึ้น นักวิทยาศาสตร์ยังพยายามที่จะอธิบายปัญหาความเข้าใจพื้นฐานต่างๆของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกันมากขึ้น ถึงแม้ในปัจจุบันยังไม่สามารถทำความเข้าใจได้ทั้งหมด แต่ก็มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ในทางวิศวกรรมได้มีความพยายามนำความรู้ความเข้าใจพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ไปใช้งานต่างๆมากขึ้น สำหรับในอนาคตอันใกล้ หากสามารถอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ทั้งหมด ก็จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น

1.1 ประวัติความเป็นมาของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

คุณสมบัติหลักอย่างหนึ่งของโลหะคือ ความต้านทานไฟฟ้า นักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจอย่างมากเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ไฟฟ้าของวัสดุเมื่ออุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป Kamerlingh-Onnes ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิของฮีเลียมเหลว โดยใช้ปรอทเป็นวัสดุในการทดลอง เพราะเขาคิดว่าปรอทมีความบริสุทธิ์สูงเพียงพอ

ในปี ค.ศ. 1911[1] Kamerlingh-Onnes ได้ค้นพบปรากฏการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีการศึกษากันอย่างมากจนถึงปัจจุบันนี้ เขาพบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 4.2 K ความต้านทานไฟฟ้าของปรอทได้หายไปทันที ซึ่งได้เรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต สิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างคือ การเติมสารเจือปนในปรอทไม่สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดของปรอทได้ ดังนั้นเหตุผลตอนต้นที่ Kamerlingh-Onnes เลือกใช้ปรอทที่มีความบริสุทธิ์นั้น จึงสรุปได้ว่าความบริสุทธิ์ของสารนั้น ไม่มีความสำคัญกับการเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

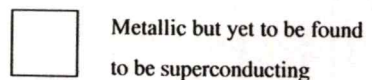
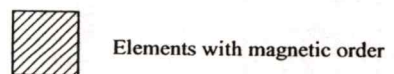
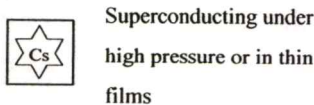
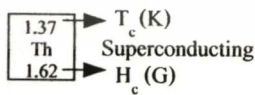
ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบปรากฏการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดในธาตุจำพวกโลหะต่างๆ มากกว่า 20 ชนิด โดยแสดงแผนผังธาตุต่างๆที่เกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดดังรูปที่ 1.1 ธาตุจำพวกโลหะทั้งหมดนั้นสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ขณะที่ธาตุจำพวกอัลคาไล อัลคาไลเอิร์ท และพวกสารแม่เหล็กไม่เกิดปรากฏการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนวัสดุพวกอัลลอยด์ที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าธาตุจำพวกโลหะ ปี ค.ศ.1959 ได้ค้นพบสารประกอบ Nb_3Sn ซึ่งเป็นวัสดุพวกอัลลอยด์มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 18 K จากนั้นค้นพบ $Nb_3(Al_{0.8}Ge_{0.2})$ ที่อุณหภูมิวิกฤต 20.05 K และ $Nb_{12}Al_3Ge$ ที่อุณหภูมิวิกฤต 20.8 K ซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของธาตุไฮโดรเจน 0.5 K ก่อนที่จะมีการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้ค้นพบฟิล์มบาง Nb_3Ge ที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

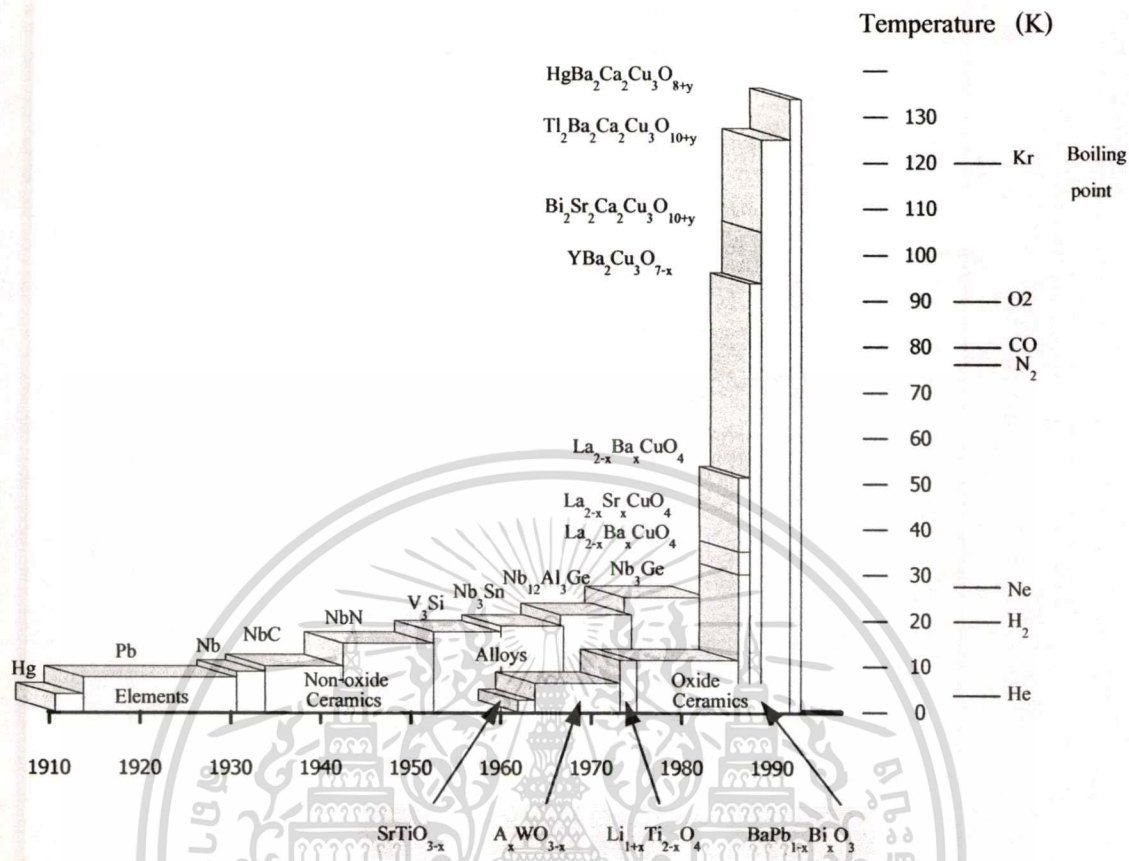
วิกฤต 23.3 K หลังจากนักวิจัยได้ใช้เวลาหลายปีในการศึกษาหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ในปี ค.ศ. 1986 Bednorz และ Muller ได้ค้นพบปรากฏการณ์นำไฟฟ้ายิ่งยวดในสารประกอบออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ perovskite คือ $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ (LBCO) มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 30 K เมื่อ $x = 0.15$ จากนั้น Wu และคณะได้มีการทดลองเปลี่ยนสารจาก La มาเป็น Y ได้เป็นสารประกอบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 93 K ซึ่งเป็นความก้าวหน้าในทางวิทยาศาสตร์เป็นอย่างมากเพราะอุณหภูมิวิกฤตนี้สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อเย็น อีกทั้งไนโตรเจนเหลวมีอยู่มากมายและราคาถูก ในปีเดียวกันได้ค้นพบสารประกอบ $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+y}$ (Bi2212) และ $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+y}$ (Bi2223) ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 80 K และ 110 K ตามลำดับ หลังจากนั้นไม่นานได้ค้นพบสารประกอบที่เป็นโครงสร้างผลึก $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Tl2223) มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 125 K และในปี ค.ศ. 1993 ได้ค้นพบสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายกันอีกคือ $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+y}$ ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 133 K ซึ่งประวัติความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [2] แสดงในแผนผังดังรูปที่ 1.2

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											1.14 Al 105	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	0.39 Ti 100	5.38 V 1420	Cr	Mn	Fe	Cob	Ni	Cu	0.88 Zn 53	1.09 Ga 51	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	0.55 Zr 47	9.50 Nb 1980	Ti	0.92 Mo 95	0.51 Ru 70	Rh	Pd	Ag	0.56 Cd 30	3.40 In 293	3.72 Sn 309	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	0.12 Hf	4.48 Ta 830	0.01 W 1.07	1.4 Re 198	0.66 Os 65	0.14 Ir 19	Pt	Au	4.15 Hg 412	2.39 Tl 171	7.19 Pb 803	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
		6.00 La	1.37 Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	1.37 Th 1.62	1.4 Pa	U	Np	Pu										



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงธาตุที่สามารถเกิดสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



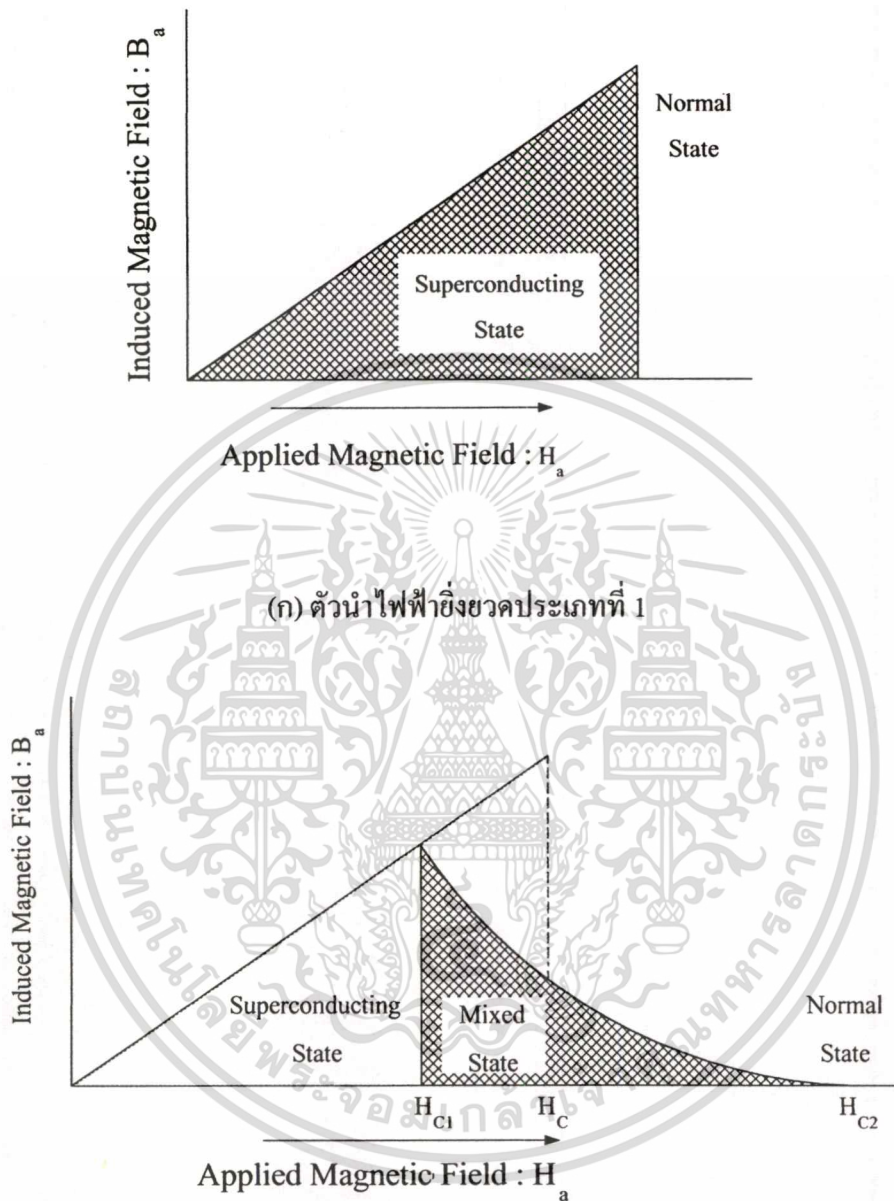
รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงความก้าวหน้าของการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สำหรับทฤษฎีที่จะนำมาอธิบายพฤติกรรมการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในสารประกอบต่างๆ ซึ่งมีมากมายหลายชนิดนั้นยังไม่สมบูรณ์เพียงพอ แต่ก็มี ความเข้าใจบางอย่างที่นักวิทยาศาสตร์ได้รู้และปรากฏออกมาบ้างแล้ว โดยจะเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยต่อไป

1.2 สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีทั้งประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤต (T_c) มีค่าต่ำและที่มีค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตสูงประเภทที่สนามแม่เหล็ก วิกฤตมีค่าต่ำมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก ส่วนประเภทที่สนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าสูงมักเป็นวัสดุที่มีความแข็งไม่มาก ดังนั้นถ้ามองด้านความแข็งแรงของวัสดุอาจแบ่งออกเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบอ่อน และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบแข็ง แต่ในปัจจุบันประเภทของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมักแบ่งตามคุณสมบัติทางแม่เหล็กเป็น 2 ประเภท และมีชื่อเรียกว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

ลักษณะการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้ง 2 ประเภทเมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอกให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [1] (ก) ประเภทที่ 1 (ข) ประเภทที่ 2

คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารเจือปนและวิธีการขึ้นรูปและกราฟการเป็นแม่เหล็กก็มีรูปเป็นฮิสเตอร์รีซิส การเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเจือปนหรือวิธีการขึ้นรูปอาจทำให้ตัวนำไฟฟ้าประเภทที่ 1 กลายเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในอุดมคติมักจะหมายถึงตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1

ความยาวที่เป็นแฟกเตอร์สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้แก่ penetration depth (λ) และ coherence length (ξ) แฟกเตอร์ตัวแรกแสดงความลึกของการซึมซาบหรือทะลุทะลวงของสนามแม่เหล็กเข้าสู่ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ส่วนแฟกเตอร์ตัวที่สองแสดงระยะทางขอบเขต ซึ่งคุณสมบัติของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในขอบเขตนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง

สมมติให้ว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วยส่วนที่มีสภาพเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดและส่วนที่มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา ในสภาพเช่นนี้สนามแม่เหล็กในส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดาจะมีค่า H_c เสมอ และสนามแม่เหล็ก H_c นี้ซึมซาบเข้าไปในส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยความลึก λ ในสภาพ perfect diamagnetic ($m = -H_c$) พลังงานอิสระ (free energy) จะมีขนาดมากกว่ากรณีสนามแม่เหล็กซึมซาบได้อยู่ถึง $\int_0^{H_c} (-\mu_0 m) dH = \frac{\mu_0 H_c^2}{2}$

ดังนั้นที่บริเวณพรมแดนนั้นการซึมซาบของสนามแม่เหล็กจะทำให้พลังงานแม่เหล็กมีขนาดน้อยกว่ากรณีไม่ซึมซาบเป็นปริมาณ $\lambda(\mu_0 H_c^2/2)$ แต่ในขณะเดียวกันความลึก ξ จากพรมแดนนั้นเป็นบริเวณทรานซิสชันที่กำลังเปลี่ยนจากสภาวะนำไฟฟ้าปกติไปสู่สภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าน้อยกว่าในสถานะนำไฟฟ้าปกติเป็นค่า $\mu_0 H_c^2/2$ เพราะฉะนั้นการที่ย่านทรานซิสชันมีความลึก ξ ทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้น $\xi(\mu_0 H_c^2/2)$ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีย่านทรานซิสชันเลย ดังนั้นพลังงานที่จำเป็นในการสร้างผิวพรมแดนต่อหน่วยพื้นที่คือ

$$\alpha_{N,S} \cong (\xi - \lambda) \frac{\mu_0 H_c^2}{2} \quad (1.1)$$

จากสมการนี้ทำให้เราทราบว่า ถ้า ξ มากกว่า λ พลังงานจำเป็นในการสร้างพรมแดนมีค่าเป็นบวก เพราะฉะนั้นพรมแดนจะมีเกิดภายในเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยาก แต่ถ้า ξ น้อยกว่า λ ดังนั้น $\alpha_{N,S}$ จะมีค่าเป็นลบ แสดงว่าการสร้างพรมแดนภายในเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะทำให้พลังงานมีค่าลดลง นั่นคือการมีส่วนที่เป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าปกติและส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าปกติยิ่งยวดจะทำให้วัสดุมีสถานะเสถียรภาพ

ถ้าวัสดุเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 เนื่องจากพลังงาน $\alpha_{N,S}$ ที่ผิวมีค่าเป็นบวก ครอบไว้ที่ H_c ยังมีค่าน้อยกว่า H_c ภายในวัสดุจะไม่มีส่วนที่เป็นตัวนำปกติเลยวัสดุจึงแสดงปรากฏ

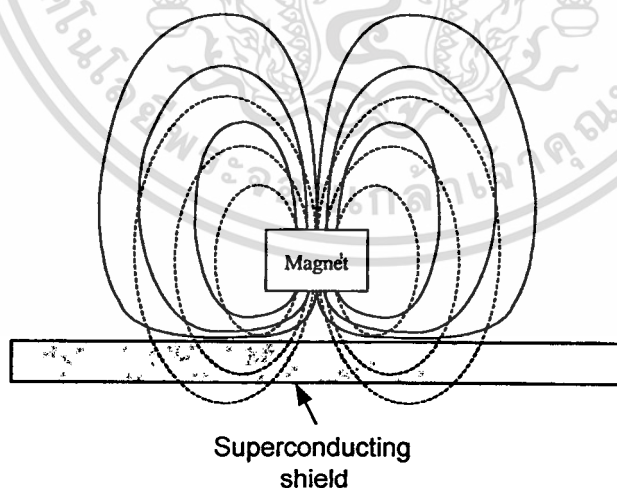
การฉีกไหมส์เนอร์ และสนามแม่เหล็กในวัสดุมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้า H_u มีค่าสูงกว่า H_c วัสดุก็จะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าปกติ และสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ $\mu_0 H_u$

ถ้าวัสดุเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 เนื่องจากพลังงานที่ผิวมีค่าลบ ดังนั้นภายในเนื้อวัสดุจึงมีทั้งตัวนำไฟฟ้าปกติและตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในกรณีนี้จะมีได้ก็คือ กรณี H_u มีค่าสูงเกินค่า H_{c1} ซึ่งเรียกค่านี้ว่า lower critical field ถ้า H_u มีค่าสูงกว่า H_{c1} แต่ยังต่ำกว่า H_{c2} (upper critical field) ในเนื้อวัสดุจะมีทั้งส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าปกติและส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดผสมกัน เมื่อ H_u มีค่ามากขึ้น ปริมาตรของตัวนำไฟฟ้าปกติก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อ H_u มากกว่า H_{c2} วัสดุก็จะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้าปกติทั้งหมด

1.3 คุณสมบัติที่สำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดคือปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด กล่าวคือตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะผลักเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำออกจากตัวมัน โดยไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้เลย พฤติกรรมของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ เป็นคุณสมบัติของแม่เหล็กไดอาที่สมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) รูปที่ 1.4 เป็นรูปเส้นแรงแม่เหล็กและแท่งแม่เหล็กที่ลอยอยู่เหนือชิ้นสารในสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวด [2]



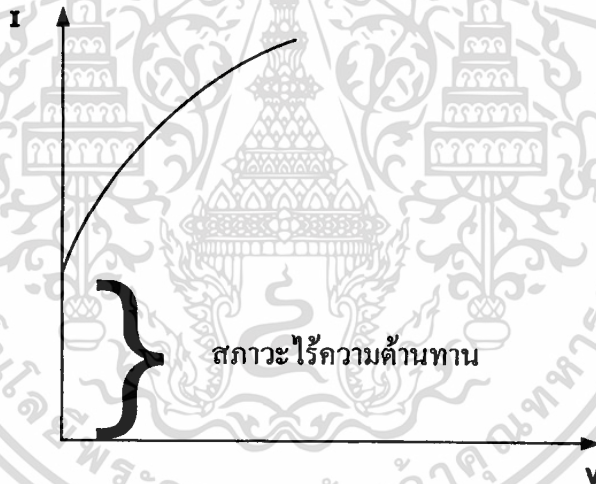
รูปที่ 1.4 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กขณะเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ เส้นประแสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กขณะผ่านตัวนำปกติ เส้นทึบแสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กขณะเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเส้นแรงของแม่เหล็กจะบิดเบี้ยว เนื่องจากไม่สามารถผ่านผิวหน้าของตัวนำไฟฟ้า ยิ่งขุดเข้าไปได้ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงผลักดันให้แท่งแม่เหล็กลอยอยู่เหนือชิ้นสาร ในส่วนของเส้นประแสดงให้เห็นลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาวะปกติที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้าขุด

1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุพวกโลหะนั้น เกิดขึ้นจากอะตอมมีการสั่นสะเทือน เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ และเนื่องจากมีอะตอมที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในตัวนำไฟฟ้าขุดการเกิดสภาพไร้ความต้านทานไม่ได้เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารแต่อย่างใด ซึ่งจากการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้าขุดชนิดใหม่ๆ แสดงให้เห็นว่าสภาพนำไฟฟ้าขุดนั้นไม่ได้เกิดเฉพาะวัสดุพวกโลหะที่มีความบริสุทธิ์เท่านั้น แต่ในสารประกอบพวกอัลลอยด์ก็สามารถเกิดสภาพนำไฟฟ้าขุดได้เช่นกัน



รูปที่ 1.5 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

รูปที่ 1.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้กระแสไบอัสค่าต่างๆกับสารตัวนำไฟฟ้าขุด แรงดันตกคร่อมสารตัวนำไฟฟ้าขุดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งกล่าวได้ว่าตัวนำไฟฟ้าขุดมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ หรือมีสภาพไร้ความต้านทานไฟฟ้า

1.3.3 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

ในสภาวะไร้ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าขุด กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าขุดจะไม่สูญเสียพลังงาน เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าขุดมีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ แต่เมื่อปริมาณกระแสไหลผ่านมากขึ้น จนถึงค่าหนึ่งซึ่งทำให้ตัวนำไฟฟ้าขุดเริ่มมีค่าแรงดันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงเวสสำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

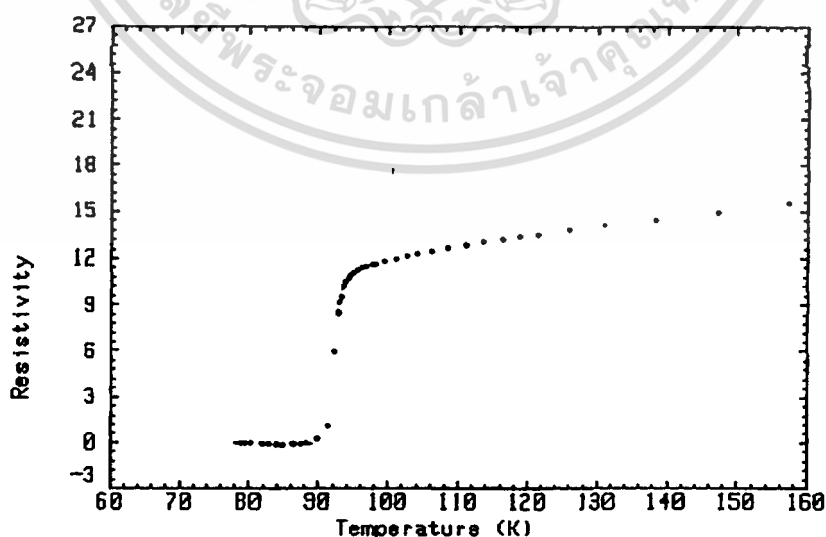
คร่อมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีลสบี ค่าความต้านทานของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณกระแสที่ไบอัสมากขึ้น

1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.1 อุณหภูมิวิกฤต

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ โลหะทั่วไปค่าความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะลดลง ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิกำหนดที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเป็นศูนย์ทันที อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตจะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ชิ้นสารจะสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดกลายเป็นสารตัวนำไฟฟ้าปกติ

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิดจะมีค่าอุณหภูมิวิกฤตแตกต่างกัน ปัจจุบันพบว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุดคือ $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+y}$ โดยมีอุณหภูมิสูงถึง 133 เคลวิน สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้มีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 93 เคลวิน ซึ่งสามารถใช้ในโคโรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นได้ และเนื่องจากในโคโรเจนเหลวทาง่ายราคาถูก จึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อย

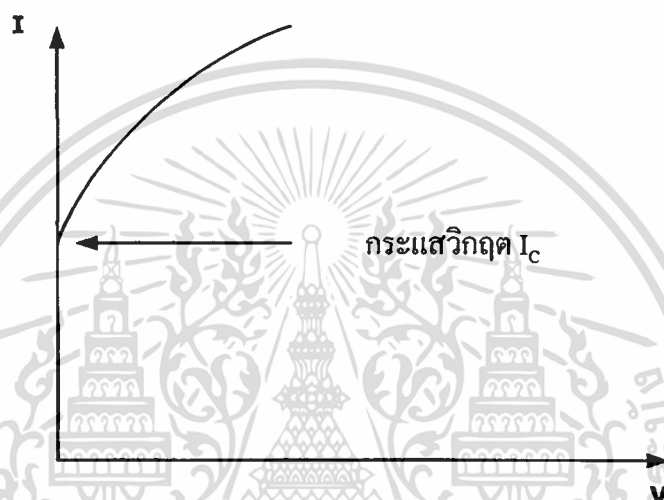


รูปที่ 1.6 อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2 กระแสวิกฤต

การสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิวิกฤตของสารเท่านั้น ถึงแม้ว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต แต่ก็สามารถสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ เนื่องจากปริมาณกระแสที่ไหลผ่านชิ้นสาร ค่ากระแสที่ทำให้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น เรียกว่า กระแสวิกฤต (I_c) ค่ากระแสวิกฤตในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละชนิดนั้นมีค่าแตกต่างกัน สำหรับค่ากระแสวิกฤตที่เหมาะสมกับการนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานนั้น ขึ้นอยู่กับงานนั้นๆ



รูปที่ 1.7 กระแสวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

1.4.3 สนามแม่เหล็กวิกฤต

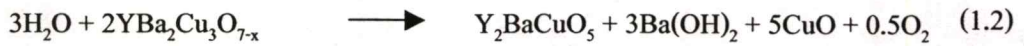
การเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอาจเกิดขึ้นได้ในขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต คือเกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ค่าสนามแม่เหล็กที่มีค่ามากพอที่จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มเสียสภาพนั้นเรียกว่า ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต การเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 การเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเกิดขึ้นทันทีทันใด ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 การเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเกิดค่อยๆเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มากขึ้น

1.5 ปฏิกริยาที่มีผลกับการลดประสิทธิภาพของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

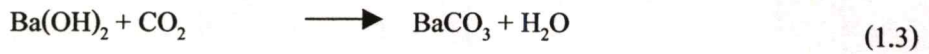
นอกเหนือจากปัจจัยทั้ง 3 ข้างต้นที่ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ปฏิกริยาทางเคมีเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถเกิดได้กับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด [3] เช่น ปฏิกริยาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้รู้เห็นว่ามีประโยชน์ในการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาระหว่างเฟสนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับไอน้ำ



ถ้าในระบบมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปฏิกิริยาของ $\text{Ba}(\text{OH})_2$ จะเป็นดังสมการที่ 1.3



ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซับน้ำ โดยเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของสารจะเพิ่มขึ้น 14.5 % หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุด ในรูปที่ 1.8 เป็นภาพถ่าย จะเห็นว่าชั้นสารมีการขยายตัวเป็นรอยแตกซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ ทำให้ชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ มีประสิทธิภาพลดลง



รูปที่ 1.8 ลักษณะของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ

ตารางที่ 1.1 สารละลายที่มีปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

Water Content Solvent	Predominant (wt%)	Y-Ba-Cu Phase
Acetone	0.32	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Isopropanol	0.11	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Ethyl alcohol	0.27	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Benzene	0.021	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Toluene	0.015	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Methanol	0.16	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Isoamyl alcohol	0.31	BaCO ₃ , CuO + additional phase(s)
Formamide	0.05	Multiple phases
N-Methyl formamide	0.16	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
N,N-Dimethyl formamide	0.060	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
Acetic acid	0.046	C ₄ H ₆ CuO ₄ + YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}

จากตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับสารบางชนิด ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดการสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั่นเอง

1.6 กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั่วไป[3]

กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ละวิธีจะมีข้อดีและความเหมาะสมแตกต่างกันไป สำหรับกระบวนการสร้างที่นำเสนอต่อไปนี้ จะเป็นหลักการสร้างอย่างง่าย ๆ ของแต่ละกระบวนการ

1.5.1 Screen printing

เทคนิคการสร้างด้วยวิธีนี้มีความสะดวกกับการสร้างที่ต้องการชิ้นงานที่มีผิวหน้าพื้นที่ขนาดใหญ่ ขั้นตอนการสร้างเริ่มจากผสมผงสาร Y₂O₃, BaCO₃ และ CuO ทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปเคลือบที่อุณหภูมิ 800-900 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำผงสารที่ได้จากการเคลือบผสมกับ propylene glycol หรือ octyl alcohol หรือ heptyl alcohol จนเป็นของเหลวข้น แล้วทำการสกรีนสารลงบนฐานรอง โดยใช้แผ่นซิลิกอนที่มีขนาด 150 mesh จากนั้นนำไปอบแห้ง

ในสูญญากาศที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C จากนั้นแอนนัลที่บรรยากาศหรือในก๊าซออกซิเจน สำหรับฐานรองที่เหมาะสมกับวิธีการสร้างนี้คือ SrTiO₃

1.5.2 Spay pyrolysis

เทคนิคของกระบวนการสร้างด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง การเตรียมสารเริ่มจากใช้สารละลายไนเตรคของ Y Ba และ Cu ในอัตราส่วน 1:2:3 สารละลายนี้ควรมีปริมาณสาร YBa₂Cu₃O_{7-x} ประมาณ 2-3 กรัมต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร โดยทำการฉีดพ่นสารละลายลงบนฐานรองที่มีอุณหภูมิประมาณ 300-600 จากนั้นทำการแอนนัลที่บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 950 และลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ สำหรับฐานรองที่เหมาะสมกับเทคนิคการสร้างนี้คือ SrTiO₃ และ Yttria ส่วนควอร์ซและอลูมินายังไม่ปรากฏว่าใช้ได้กับวิธีการสร้างแบบนี้

1.5.3 Plasma Spay deposited thick films

กระบวนการเตรียมสารโดยวิธีนี้ เริ่มจากซินเตอร์ผงสาร Y ผงสารนี้ต้องมีขนาดประมาณ 40 ไมโครเมตร จากนั้นนำผงสารพ่นเข้าไปในดีซีพลาสมาที่อุณหภูมิประมาณ 11000-12000 เคลวิน โดยมีก๊าซผสมระหว่าง Ar-H₂ หรือ Ar-He เป็นตัวกลาง อนุภาคของสารจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงไปยึดเกาะบนผิวหน้าของฐานรอง ฐานรองที่ใช้ในวิธีนี้มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ควอร์ซ อลูมินา ฯลฯ อัตราของการเกิดฟิล์มประมาณ 2 ไมโครเมตรต่อนาที ฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 250 ไมโครเมตร หลังจากนั้นทำการซินเตอร์ที่บรรยากาศออกซิเจนเพื่อให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์ ข้อดีของกระบวนการสร้างฟิล์มแบบนี้คือมีอัตราการเกิดฟิล์มสูง สามารถควบคุมขนาดรูปร่างและพื้นที่ให้มีขนาดใหญ่ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มแรกนั้น ได้มีการทดลองพบว่าความต้านทานเป็นศูนย์ของปรอท โดยนักวิทยาศาสตร์ Kamer lings Onnes ในปี ค.ศ. 1911 จากนั้นได้มีการค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดของโลหะหลายชนิด ประกอบด้วยอัลลอยด์ และพวกสารประกอบหลายชนิด สำหรับปรากฏการณ์ที่สำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเท่าศูนย์ ซึ่งมีการค้นพบในปี ค.ศ.1933 โดย F. และ H. London พวกเขาได้เสนอสมการ London (London Equation) ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีแรกที่ได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและกระแสซูเปอร์คอนดัคติ้ง (Superconducting Current) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ London penetration depth (λ_L) ค่านี้ถูกอธิบายในทฤษฎีนี้ด้วย กล่าวคือสนามแม่เหล็กสามารถที่จะผ่านเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ไม่เกินค่า λ_L ซึ่งมีค่าประมาณ 0.01 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ได้อธิบายเฉพาะกรณีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 1 เท่านั้น สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 2 นั้น ได้มีทฤษฎีอธิบายไว้เมื่อปี 1950 โดย Ginzburg-Landau ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ Coherence length (ξ) เป็นค่าความกว้างของแถบระหว่างสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับสถานะนำไฟฟ้าปกติ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 นั้นถูกแยกแยะโดยความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ $K = \lambda_L/\xi$ โดยที่ λ_L มีค่าแตกต่างจากค่า λ_L น้อยมาก

สำหรับทฤษฎีระดับจุลภาคที่นำมาอธิบายในปี 1957 คือทฤษฎีบีซีเอส(BCS Theory) โดยทฤษฎีนี้ได้สมมุติอิเล็กตรอน 2 ตัวที่มีสปินและโมเมนตัมทิศทางตรงกันข้าม อิเล็กตรอนของตัวนี้เกิดเป็นคูเปอร์แพร์ (Cooper pair) และซูเปอร์คอนดัคชันอิเล็กตรอนก็คืออิเล็กตรอนที่คูเปอร์แพร์ ส่วนความยาวโคฮีเรนซ์ในทฤษฎี GL ได้อธิบายถึงขนาดของคูเปอร์แพร์ และความหนาแน่นของซูเปอร์คอนดัคชันอิเล็กตรอน ซึ่งพบว่าและความหนาแน่นของคูเปอร์คอนดัคชันอิเล็กตรอนนี้เป็นสัดส่วนกับค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) โดยช่องว่างพลังงานนี้เป็นสัดส่วนกับค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) และความถี่วิกฤต (Critical frequency) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขณะตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด หลังจากทฤษฎีบีซีเอสได้ปรากฏขึ้นมา 3 ปี Gorker ก็ได้อธิบายทฤษฎีทางจุลภาคให้สมบูรณ์ได้มากขึ้น ในกรณีที่พารามิเตอร์ของ E_g มีการเปลี่ยนแปลง และเชื่อว่าสามารถอธิบายกลไกของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดระดับจุลภาคได้ดีที่สุดในขณะนั้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีคำตอบชัดเจนสำหรับการอธิบายกลไกทั้งหมดของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเป็น Perfect Conductivity และ Perfect diamagnetism [4]

ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีความต้านทานเป็นศูนย์ ดังนั้นแม้กระแสไฟฟ้าจะไหล แต่ก็จะไม่เกิดความต่างศักย์และไม่เกิดการสูญเสียความร้อนของ Joule จากรูปที่ 2.1 วัสดุทรงกลมมีอุณหภูมิ $T > T_c$ และถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก H โดยวัสดุทรงกลมนี้ อยู่ในสภาพนำไฟฟ้าแบบธรรมดา ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงซึมซาบเข้าไปในทรงกลมได้ จากนั้นลวดอุณหภูมิของทรงกลมให้ต่ำกว่า T_c จนทำให้อยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเป็นศูนย์เสมอ และไม่ขึ้นกับขั้นตอนการลดอุณหภูมิหรือการป้อนสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.1 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่เพียงแต่เป็น Perfect conductor แต่ในขณะเดียวกันก็เป็น Perfect diamagnetic ซึ่งไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมซาบเข้าไปภายใน คุณสมบัติการเป็น Perfect diamagnetic นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner effect)

ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นอิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่ต่อการนำไฟฟ้ามี 2 ชนิดคือ ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอน (Superconduction electron) และนอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอน หรืออิเล็กตรอนนำไฟฟ้าธรรมดา (Normal conduction electron) ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กตรอนเป็นตัวพากระแสไฟฟ้าแบบซูเปอร์คอนดักชันหรือแบบยิ่งยวดได้โดยปราศจากแรงต้านทานใดๆทั้งสิ้นจากโครงผลึก ส่วนนอร์มอลคอนดักชันอิเล็กตรอนนั้นจะถูกแรงต้านทานจากข้อบกพร่องต่างๆในผลึก ในสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด J_s (Superconductive current) กับสนามไฟฟ้า E และสนามแม่เหล็ก H

$$E = \Lambda \frac{\partial J_s}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$H = -\nabla \times \left(\frac{\Lambda}{\mu_0} \right) J_s \quad (2.2)$$

โดยที่ Λ : ค่าคงที่ของวัสดุ

μ_0 : magnetic permeability ของสุญญากาศ

สมการทั้ง 2 นี้เรียกว่าสมการของลอนดอน (London's equations) สมการที่ 2.1 เป็นสมการที่แสดงถึงคุณสมบัติของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์ว่าเป็นตัวทำให้เกิด Perfect conduction ซึ่งอธิบายในรายละเอียดต่อไป

กำหนดให้ e^* : ประจุไฟฟ้าของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์

m^* : มวลของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์

n_s : ความหนาแน่นของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์

v_s : ความเร็วของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ายิ่งยวดคือ

$$J_s = n_s e^* v_s \quad (2.3)$$

ถ้ามีสนามไฟฟ้า E แรงที่ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์จะได้รับคือ e^*E แต่เนื่องจากในขณะกำลังเคลื่อนที่นั้น ซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้รับแรงต้านทานใดๆ จึงได้รับความเร่งจากแรงนั้น

$$e^* E = m^* \frac{\partial v_s}{\partial t} = \left(\frac{m^*}{n_s e^*} \right) \frac{\partial J_s}{\partial t} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.3 ถ้าให้ $\Lambda = m^*/n_s e^{*2}$ ก็จะได้สมการที่ 2.4 สำหรับสมการที่ 2.2 พิสูจน์ได้ดังนี้ เนื่องจากสมการที่ 1 ของ Maxwell คือ

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.5)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \Lambda J_s + \mu_0 H) = 0 \quad (2.6)$$

และ

$$\therefore \nabla \times (\Lambda J_s) + \mu_0 H = \text{ค่าคงที่} \quad (2.7)$$

ถ้าสมมติให้ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับเวลาในเทอมทางขวามือเป็นศูนย์ ก็จะได้สมการที่ 2.2 สำหรับปรากฏการณ์ไมสเนอร์พิสจันน์โดยใช้สมการที่ 16.3 จากสมการของ Maxwell

$$\nabla \times H = J_s \quad (2.8)$$

และจากความสัมพันธ์

$$\nabla \times \nabla \times H \equiv \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H, \nabla H = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 H = \frac{H}{\lambda_L^2} \quad (2.10)$$

โดยที่ λ_L เรียกว่าความลึกของการซึมซาบของสนามแม่เหล็กของลอนดอน (London's penetration depth)

$$\lambda_L = \left(\frac{\Lambda}{\pi_0} \right)^{1/2} = \left(\frac{m^*}{\mu_0 n_s e^{*2}} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

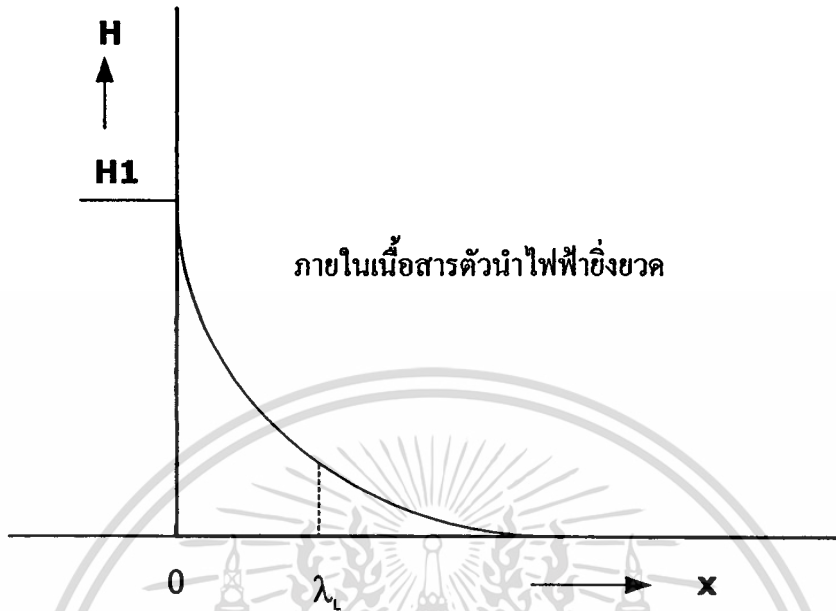
สมมติว่า วัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีปริมาตรตั้งแต่ $x \geq 0$ เป็นต้นไป และเราป้อนสนามแม่เหล็กความเข้ม H_1 ในทิศทาง x สนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ($x > 0$) คำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$\frac{d^2 H(x)}{dx^2} = \frac{H(x)}{\lambda_L^2}, H(0) = H_1 \quad (2.12)$$

เมื่อ $x \rightarrow \infty$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(x) = H_1 e^{-x/\lambda_L} \tag{2.13}$$



รูปที่ 2.2 การซึมซาบสนามแม่เหล็กเข้าสู่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ลักษณะความเข้มของสนามแม่เหล็กนี้แสดงได้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งจะพบว่าสนามแม่เหล็กซึมเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้เพียงความลึก λ_L เท่านั้น บริเวณที่ลึกกว่านี้สนามแม่เหล็กเกือบเป็นศูนย์ ขนาดของ λ_L ขึ้นกับชนิดของวัสดุแต่ก็มีค่าโดยทั่วไปประมาณ 10 ถึง 100 nm ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดก้อนวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เราใช้งาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นศูนย์ และวัสดุนั้นเป็น perfect diamagnetic ค่า penetration depth ในสมการที่ 2.11 แปรผกผันกับกำลัง $1/2$ ของความหนาแน่นของซูเปอร์คอนดักชันอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับสมการที่ 2.14 เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

$$\kappa_s(T) \propto 1 - (T/T_c)^4 \tag{2.14}$$

เพราะฉะนั้น ถ้าให้ $\lambda_L(0)$ แทนค่า λ_L ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์จะได้ว่า

$$\lambda_L(T) = \lambda_L(0) [1 - (T/T_c)^4]^{1/2} \tag{2.15}$$

2.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดตัวนำ

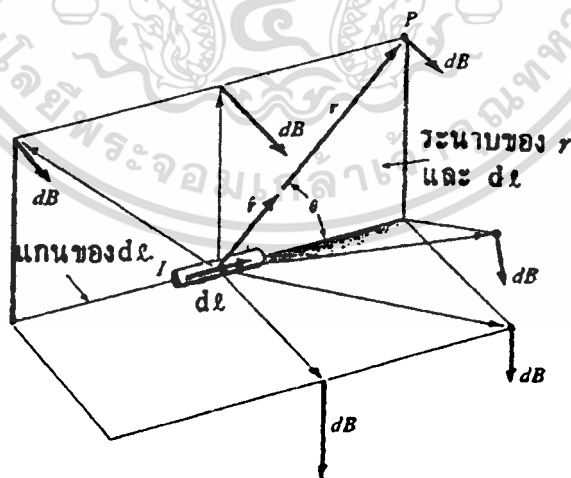
ในปัจจุบันทราบว่าปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กล้วนเกิดจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ทั้งสิ้น นั่นคือประจุเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผู้สังเกต จะทำให้เกิดทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสถิต และสนามแม่เหล็กนี้ออกแรงกระทำต่อประจุที่สองซึ่งกำลังเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผู้สังเกต เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสและอิเล็กตรอนแต่ละตัวยังหมุนรอบตัวเองอีกด้วย ดังนั้นอะตอมทุกตัวสามารถคาดได้ว่าเป็นตัวทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งความจริงก็พบว่าเป็นเช่นนั้น ในปี ค.ศ.1820 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Ampere เป็นคนแรกที่เสนอแนะว่าคุณสมบัติของสสารทางแม่เหล็กเป็นผลมาจากกระแสเล็กๆ จากอะตอมทั้งหลาย

2.3.1 สนามแม่เหล็กของชิ้นส่วนกระแส

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ โดยกระแสในวงจรถือสนามลัพธ์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากประจุที่เคลื่อนที่ทั้งหมดในวงจร วงจรสามารถแบ่งออกเป็นช่วงสั้นๆ ที่ยาว dl ซึ่งได้เขียนแสดงไว้ช่วงหนึ่งในรูปที่ 2.3 ปริมาตรของช่วงหนึ่งนี้เท่ากับ $A dl$ เมื่อ A คือพื้นที่ภาคตัดขวาง ถ้ามีประจุที่ไหลพามา n ตัวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร แต่ละประจุ q จะได้ประจุ dQ ที่เคลื่อนที่ในช่วงความยาวนี้ดังสมการที่ 2.16

$$dQ = nqAdl$$

(2.16)



รูปที่ 2.3 เวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสช่วงหนึ่ง

เพราะฉะนั้นประจุที่เคลื่อนที่จึงเทียบเท่ากับประจุเดี่ยว dQ ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว พเนจร v จากสมการ 18.26 จะได้ขนาดของ dB ณ จุดใดๆ คือ

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(dQ)(v \sin \theta)}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{nqvAdl \sin \theta}{r^2} \quad (2.17)$$

แต่ $nqvA$ เท่ากับกระแสในช่วงความยาวนี้ ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ 2.18 หรือในรูปของเวกเตอร์ดัง สมการที่ 2.19

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2} \quad (2.18)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.19)$$

สนามแม่เหล็กลัพธ์ B ณ จุดใดๆ ในบริเวณที่ว่าง ซึ่งเกิดจากกระแสลวดวงจรคือเวกเตอร์ อินทิกรัลของค่า dB ที่เกิดจากทุกชิ้นส่วนหรือทุกช่วงของวงจร ดังนั้นได้สมการที่ 2.19

2.3.2 สนามแม่เหล็กของตัวนำตรงและยาว

จากกฎของบีโธที่สามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ได้ จากรูปที่ 2.4 สนาม แม่เหล็กที่จุด P ซึ่งเกิดจากตัวนำตรงและยาวที่มีกระแสผ่าน โดยให้ r แทนระยะทางของจุด P ใน แนวรัศมีจากสายไฟ และ s เป็นเวกเตอร์จากชิ้นส่วนกระแสถึงจุด P ฉะนั้นจะได้สนามแม่เหล็กดัง สมการที่ 2.20

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{dy \times \hat{s}}{s^2} \quad (2.20)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์อินทิกรัล แต่เนื่องจากสนาม dB ที่เกิด ณ จุด P โดยชิ้นส่วนอื่นๆ ของตัวนำลวด วนานกับเวกเตอร์ dB สนามลัพธ์จึงเท่ากับผลบวกพีชคณิตหรือผลบวกของขนาด dB ส่วน s เป็น เวกเตอร์หน่วย ฉะนั้น

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \theta}{s^2} dy \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ θ เป็นตัวแปรของการอินทิเกรตจะได้ว่า

$$s = r \csc \theta, y = -r \cot \theta \quad (2.22)$$

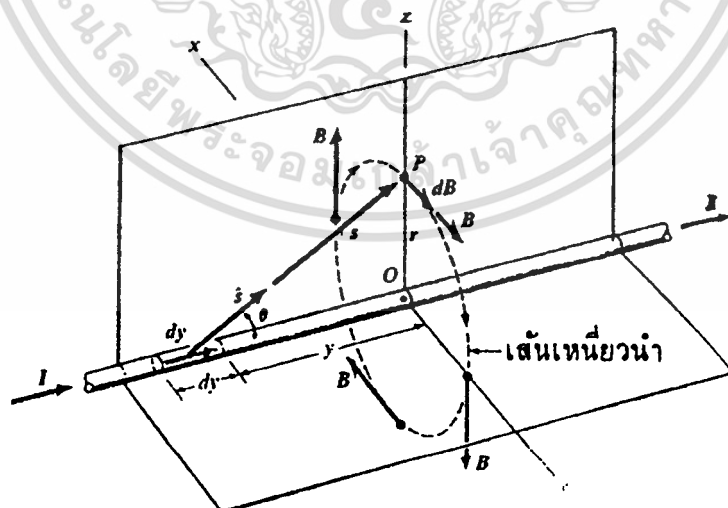
$$dy = r \csc^2 \theta d\theta \quad (2.23)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \quad (2.24)$$

ลิมิตของการอินทิเกรตกลายเป็นจาก 0 ถึง π เพราะสมมติว่าสายไฟยาวมาก เมื่ออินทิเกรตแล้วแทนค่า จะได้ดังสมการที่ 2.25

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.25)$$

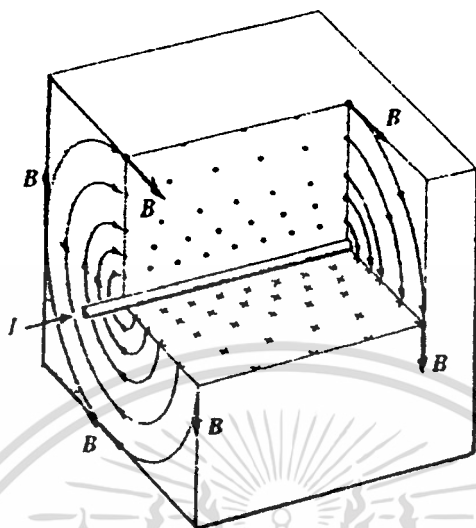
ความสัมพันธ์นี้ได้จากการทดลองของ Biot กับ Savart ก่อนที่จะพบในรูปของคิฟเฟอะ เรนเชียล



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กกรอบตัวนำตรงยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

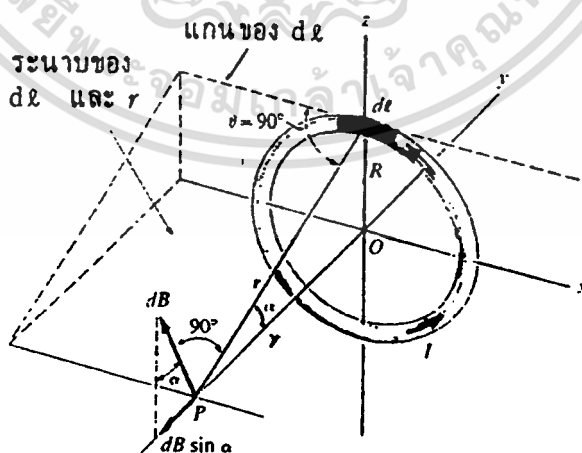
ส่วนหนึ่งของสนามแม่เหล็กรอบตัวนำตรงและยาวได้แสดงให้เห็นเป็นภาพตัดขวางดัง
 ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็กรอบตัวนำตรงยาว

2.3.3 สนามแม่เหล็กของลวดที่พันเป็นวงกลม

ในเครื่องมือหลายอย่างซึ่งใช้กระแสเป็นตัวการให้เกิดสนามแม่เหล็กเช่น หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งพันสายไฟให้เป็นขดลวด เพราะฉะนั้นในการพิจารณาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดนี้ จะเริ่มพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟที่พันรอบวงกลม 1 รอบ ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กเกิดจากช่วงยาว dl ของสายไฟพันเป็นวงกลมที่มีกระแส I ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้สายไฟวงกลมมีรัศมี R และกระแส I ซึ่งอยู่ในระนาบ xz จุด P อยู่บนแกนของวงกลมที่ระยะ y จากจุดศูนย์กลาง o และ r เป็นระยะทางจากชิ้นส่วน dl ของขดลวดวงกลมถึงจุด P ระนาบ dl และ r ได้แก่พื้นที่ที่แรงสนามแม่เหล็ก dB ที่เกิด ณ จุด P โดยกระแสในชิ้นส่วน dl จะตั้งฉากกับระนาบนี้และอยู่ในระนาบ yz มุมระหว่าง dl กับ r เท่ากับ 90° ดังนั้นในพจน์ของสัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภาพนี้ กฎของบีโทยต์กลายเป็น

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \quad (2.26)$$

ให้ α เป็นมุมระหว่าง r กับแกน y แล้วเวกเตอร์ dB สามารถแยกเป็นองค์ประกอบ $dB\sin\alpha$ ตามแนวแกน y และองค์ประกอบ $dB\cos\alpha$ ตั้งฉากกับแกน y จะเห็นจากสมมาตรว่า แต่ละชิ้นส่วนของขดลวดวงกลมให้สนามองค์ประกอบ $dB\sin\alpha$ นี้เท่ากัน แต่องค์ประกอบ $dB\cos\alpha$ ที่เกิดจากชิ้นส่วนของขดลวดที่อยู่ตรงข้ามจะหักล้างกันหมดไป ฉะนั้น สนามลัพธ์จึงอยู่ในแนวแกน y และหาค่าได้โดยการอินทิเกรตองค์ประกอบ $dB\sin\alpha$ นั่นคือ

$$B = \int dB \sin \alpha = \frac{\mu_0 I \sin \alpha}{4\pi r^2} \int dl \quad (2.27)$$

เนื่องจาก $\sin\alpha$ และ r คงที่ จึงเอาออกหน้าเครื่องหมายอินทิเกรตได้ ค่าอินทิกรัลจึงเท่ากับเส้นรอบวงกลมของขดลวดที่พัน 1 รอบ ซึ่งเท่ากับ $2\pi R$ ดังนั้นได้สมการคือ

$$B = \frac{\mu_0 I R \sin \alpha}{2r^2} \quad (2.28)$$

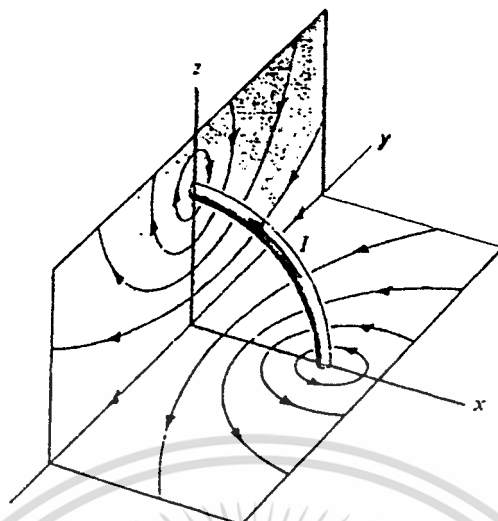
ที่จุดศูนย์กลางของวงลวด $\alpha = 90^\circ$ และ $r = R$ ดังนั้นที่จุดศูนย์กลาง

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (2.29)$$

ดังนั้น กรณีที่พันขดลวด N รอบโดยพันให้ชิดกัน ซึ่งอนุโลมให้มีรัศมีเท่ากันได้ แต่ละรอบจะให้สนามเท่ากัน ดังนั้นสมการที่ 2.30 คือ

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2R} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เส้นเหนี่ยวนำรอบลวดพันวงกลม

เนื่องจาก $\sin\alpha = R/r$ ดังนั้นอาจเขียนได้เป็น

$$B = \frac{\mu_0 I (\pi R^2)}{2\pi r^3} \quad (2.31)$$

แต่ πR^2 คือพื้นที่ของวงกลม และ $I(\pi R^2)$ คือโมเมนต์แม่เหล็ก m ฉะนั้น

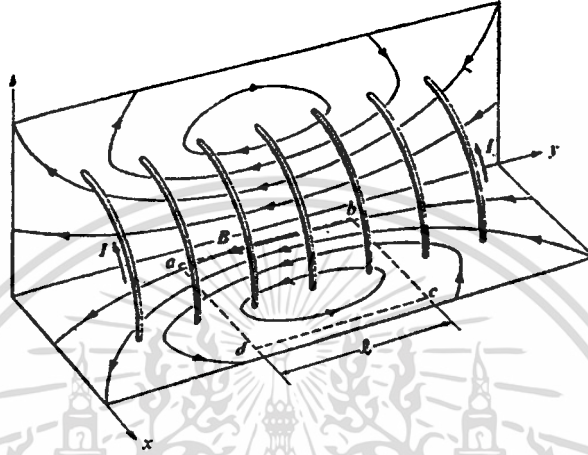
$$B = \frac{\mu_0 m}{2\pi r^3} \quad (2.32)$$

2.3.4 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์

โซลินอยด์ คือขดลวดที่พันเป็นรูป helix รอบผิวของรูปทรงกระบอก โดยปกติภาคตัดขวางเป็นวงกลม ลวดที่พันแต่ละรอบใกล้เคียงกันและอาจมีชั้นเดียวหรือมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้ เพื่อสะดวกจึงพิจารณาโซลินอยด์ซึ่งมีจำนวนรอบของขดลวดที่พันค่อนข้างน้อยและเป็นวงกลม แต่ละวงมีกระแส I สนามแม่เหล็กลัพธ์ ณ จุดใดๆคือผลบวกเวกเตอร์ B ที่เกิดจากขดลวดแต่ละวง แผนภาพแสดงเส้นเหนี่ยวนำในระนาบ xy และ yz จากการคำนวณแสดงว่าโซลินอยด์ที่พันชิดกันและยาวนั้น ครึ่งหนึ่งของเส้นที่ผ่านทะลุภาคตัดขวางที่จุดศูนย์กลางไหลออกมาจากปลาย อีกครึ่งหนึ่งออกมาทางลวดที่พันระหว่างจุดศูนย์กลางกับปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าโซลินอยด์มีความยาวมากเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของภาคตัดขวาง สนามแม่เหล็กภายในใกล้จุดศูนย์กลางค่อนข้างจะสม่ำเสมอและขนานกับแกน และสนามแม่เหล็กภายนอกใกล้จุดศูนย์กลางมีค่าน้อยมาก สนามแม่เหล็กภายในที่ศูนย์กลางหรือใกล้กับจุดศูนย์กลางสามารถหาได้โดยใช้กฎของแอมแปร์



รูปที่ 2.8 เส้นเหนี่ยวนำรอบโซลินอยด์ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า abcd

เลือกวิถีปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า abcd ในรูปที่ 2.8 ด้าน ab ยาว l ขนานกับแกนของโซลินอยด์ ด้าน bc และ da เลือกให้ยาวมากๆ เพื่อว่า cd จะได้ไกลจากโซลินอยด์และสนามแม่เหล็กที่ด้านนี้น้อยมากจนตัดทิ้งได้ จากการสมมาตร สนามแม่เหล็ก B ตามด้าน ab ขนานกับด้านนี้และคงที่ ดังนั้น $B_{\parallel} = B$ สำหรับด้านนี้ และเนื่องจาก

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I \quad (2.33)$$

สำหรับแนวด้าน bc และ da ได้ $B_{\parallel} = 0$ เนื่องจาก B ตั้งฉากกับด้านนี้ และตามแนวด้าน cd ได้ $B_{\parallel} = 0$ เพราะว่า $B = 0$ เพราะฉะนั้นผลบวกรอบตลอดวิถีปิดเท่ากับ $B l$

ให้ n เป็นจำนวนรอบที่พันต่อหนึ่งหน่วยความยาว ดังนั้น จำนวนรอบที่พันตลอดความยาว l จึงเท่ากับ nl แต่ละรอบผ่านสี่เหลี่ยมผืนผ้า abcd หนึ่งรอบ และมีกระแส I เมื่อ I คือกระแสในวงลวดแต่ละวง แล้วกระแสทั้งหมดผ่านสี่เหลี่ยมผืนผ้า คือ nIl และจากกฎของแอมแปร์จะได้

$$B l = \mu_0 n I l \quad (2.34)$$

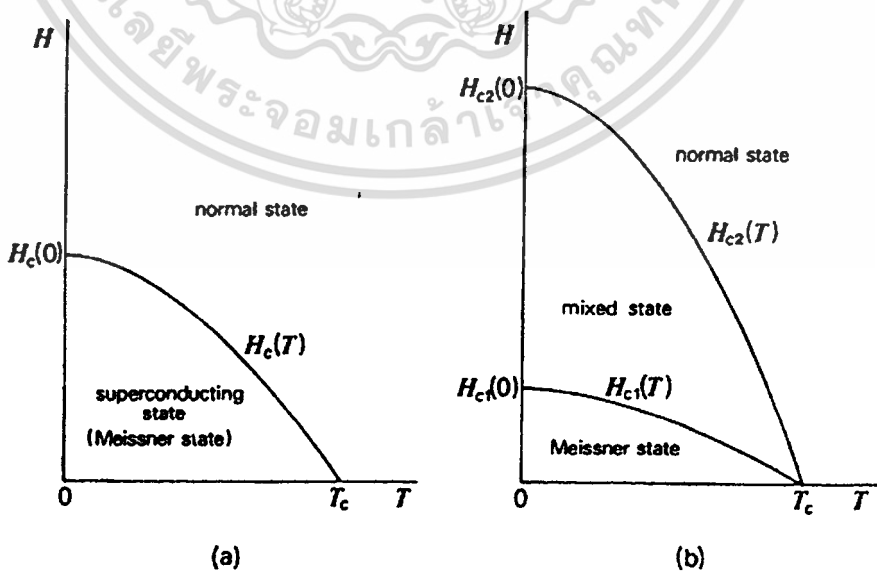
$$B = \mu_0 nI \quad (2.35)$$

เนื่องจากค่าน ab ไม่ต้องอยู่บนแกนของโซลินอยด์ สนามแม่เหล็กจึงสม่ำเสมอทั่วภาคตัดขวาง

2.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

สถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นสถานะสมดุลหนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเรียกวัสตุที่อยู่ในสถานะนี้ว่าซูเปอร์คอนดักเตอร์ (Superconductor) จากรูปที่ 2.9 อธิบายถึงลักษณะของคุณสมบัติตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและสนามแม่เหล็ก [5] โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะการนำไฟฟ้าปกติไปสู่สถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic) จากสถานะของแม่เหล็กพารา (paramagnetic) ไปสู่สถานะของแม่เหล็กเฟอร์โร การเปลี่ยนแปลงสถานะของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นไม่เพียงแต่คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีเปลี่ยนแปลง แต่ยังมีคุณสมบัติอื่นๆอีกที่เปลี่ยนไป เช่น ความร้อนจำเพาะ ความยืดหยุ่น โมดูลัส และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน

เฟสไดอะแกรมของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 1 และ 2 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่ขึ้นกับอุณหภูมิมีลักษณะเป็นพาราโบลา โดยมีเงื่อนไขความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.36



รูปที่ 2.9 กราฟคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิวิกฤต

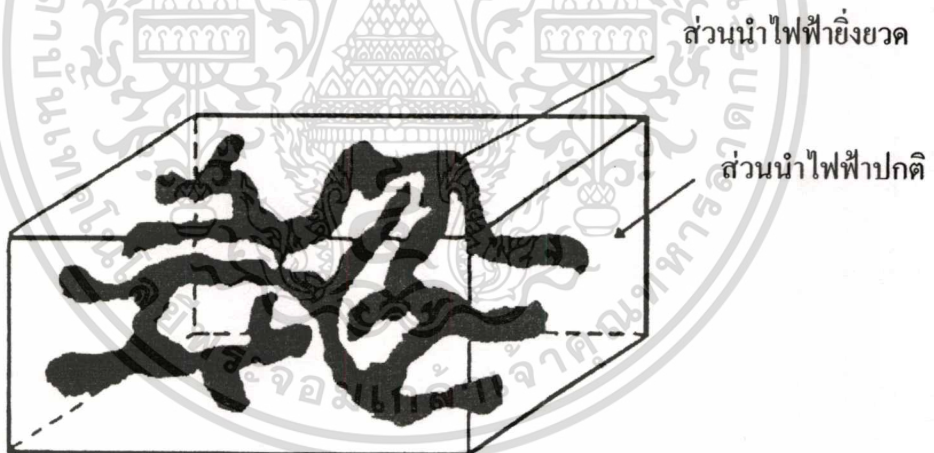
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right) \right] \quad (2.36)$$

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 2 นั้นมีค่ากระแสวิกฤตสูงมาก เมื่อเทียบกับสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดที่ 1 ซึ่งค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ($H_{c2}(0)$) นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งแสดงถึงขอบเขตของสถานะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน

2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

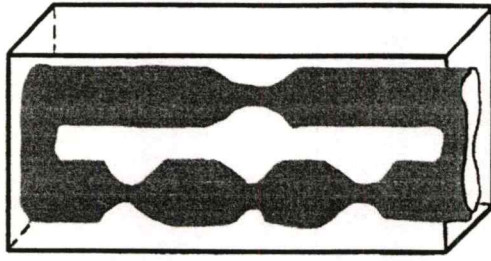
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบขึ้นรูปที่ทางห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสร้างขึ้นมานั้น มีลักษณะเนื้อสารแบบเซรามิก ซึ่งจากสมมติฐาน โครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก [6] พิจารณาได้ว่าในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย ส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งแสดงแบบจำลองดังในรูปที่ 2.10 ในส่วนของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเองมีการเชื่อมกันอย่างสม่ำเสมอ โดยมีทั้งส่วนที่เชื่อมกันอย่างแข็งแรง และเชื่อมกันอย่างหลวมๆ ซึ่งส่วนนี้เรียกว่าจุดคอด



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

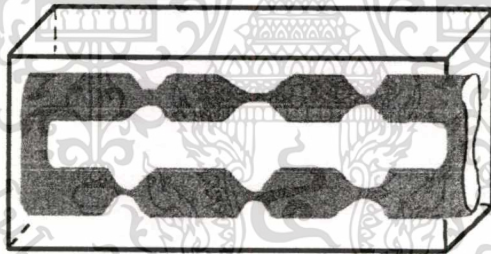
สำหรับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนาที่มีกระบวนการเตรียมผงสารเหมือนกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบขึ้นรูป เมื่อนำมาสร้างเป็นแผ่นฟิล์มหนาตามกระบวนการสร้างของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงได้สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีเนื้อสารแบบเซรามิกเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

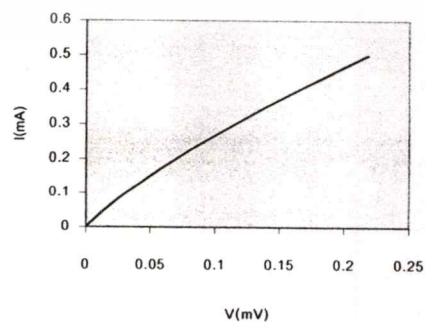
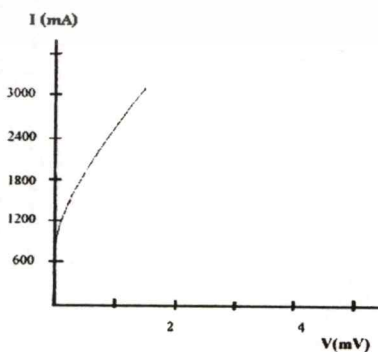


รูปที่ 2.11 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกชนิดชั้นรูป

แต่เนื่องจากไม่ได้มีการกักอัดเนื้อสาร ดังนั้นเนื้อสารจึงมีการเชื่อมต่อกันอย่างหลวมๆ จากรูปที่ 2.12 เป็นโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนาที่สร้างโดยวิธีการสกินนี้จะเห็นว่าการเชื่อมต่ออย่างหลวมๆ ของส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นจำนวนมาก และในส่วนที่เป็นจุดคอดนี้ยังมีความแข็งแรงน้อยกว่าจุดคอดในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูป



รูปที่ 2.12 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่ายของฟิล์มหนาทัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก



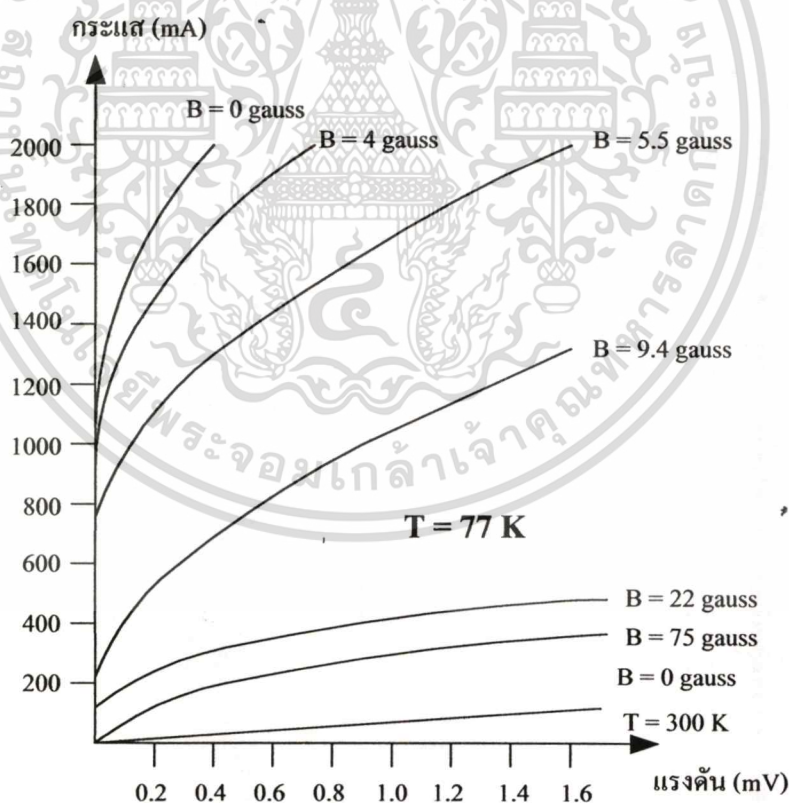
รูปที่ 2.13 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน (ก) แบบ bulk (ข) แบบฟิล์มหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 แสดงคุณสมบัติกระแสแรงดันของชั้นสารแบบชั้นรูป และชั้นสารแบบฟิล์มหนา ซึ่งจะเห็นว่าค่ากระแสวิกฤติของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนา มีค่าต่ำกว่าชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูปมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนี้ เสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ง่ายกว่าแบบชั้นรูป ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อยๆ ได้

2.6 คุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

จากการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่ไม่ต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO โดยการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ได้พบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสนามแม่เหล็กนั้นจะทำลายสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วน [6] ทำให้เกิดเป็นเสมือนความต้านทานเกิดขึ้นจึงเกิดมีค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสาร โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมนั้นจะมีค่ามากขึ้น ถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

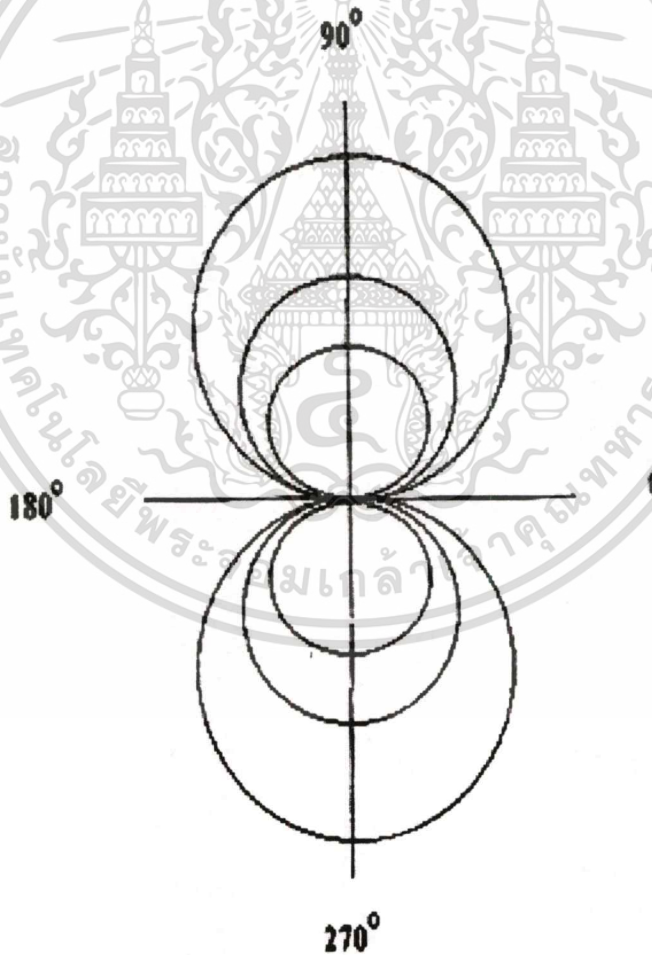
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำลายสภาพนำไฟฟ้ายังวัดด้วยความเข้มสนามแม่เหล็กตามผลการทดลองดังกล่าว นั้น ซึ่งให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายังวัดที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กได้ [7] โดยแสดงให้เห็นเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นสารนั่นเอง

2.7 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็ก [6]

2.7.1 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์

จากการที่ได้มีการทดลองวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ในทิศทางต่างๆของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ นำมาเขียนกราฟเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นว่าหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆไม่เท่ากัน

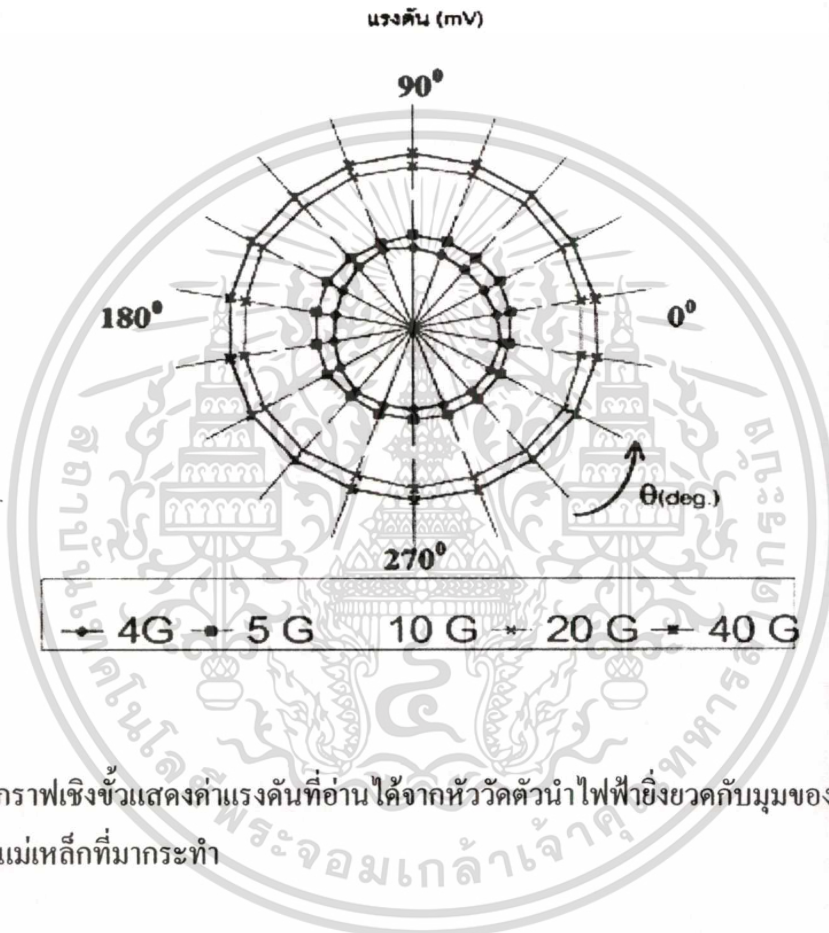


รูปที่ 2.15 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์กับมุมของสนามแม่เหล็กที่ทำการกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 หัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการที่ได้มีการทดลองวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มุมต่างๆของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นำมาเขียนกราฟเชิงขั้วดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยมีค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆกัน พบว่าได้กราฟวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่จุดกำเนิด แสดงว่าค่าสนามแม่เหล็กที่วัดด้วยหัววัดแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีขนาดเท่ากันทุกทิศทุกทาง



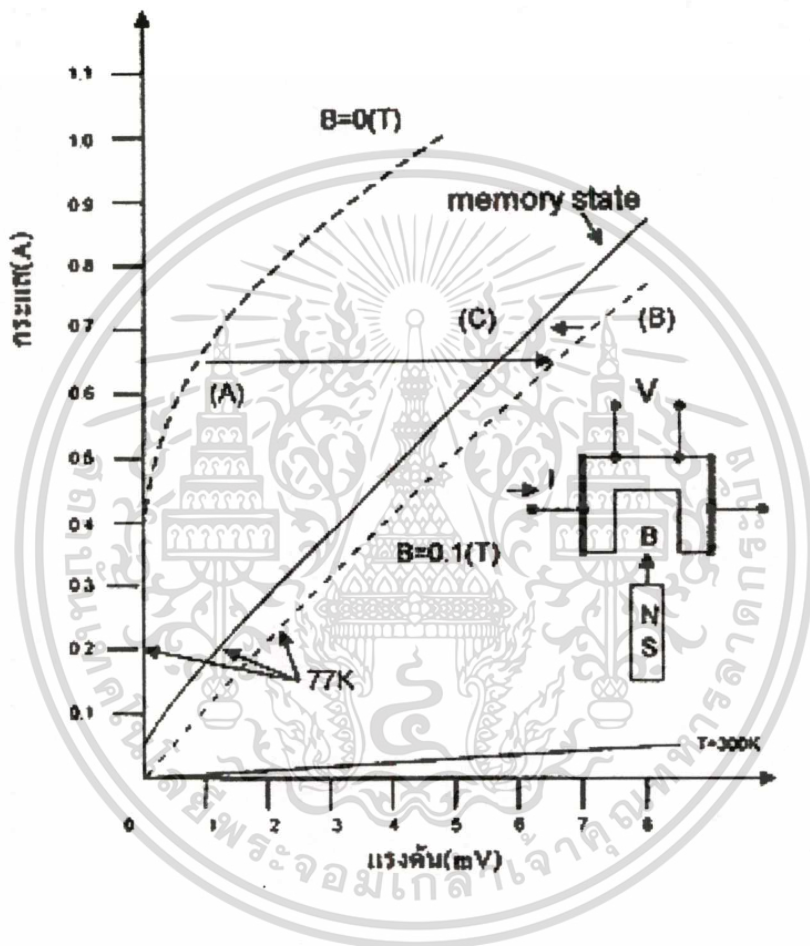
รูปที่ 2.16 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันที่อ่านได้จากหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่ทำการกระทำ

2.8 การจำสภาพแม่เหล็ก (memory) ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนั้นสามารถใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำๆได้ นอกจากนี้ในกรณีที่สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงมากๆ จะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยุติสภาพแม่เหล็กปริมาณน้อยๆ ที่ตกค้างอยู่ในตัวมันด้วย ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์การจำ จากรูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะเห็นว่ากราฟเส้น A คือผลการทดลองขณะที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกขนาด 0.1 เทสลา ซึ่งมีค่าสูง จะได้กราฟกระแสกับแรงดันเป็นดังเส้น B จากนั้นนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก ในขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเกิดปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำสภาพแม่เหล็กขึ้น กราฟกระแสกับแรงดันได้ดั่งเส้น C จะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารของกราฟเส้น C มีค่าสูงกว่าของกราฟเส้น A ที่กระแสไบอัสเท่ากัน เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่จุดแทรกทำลายสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งไปบางส่วน ทำให้เกิดแรงดันมากขึ้นกว่าก่อนเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก



รูปที่ 2.17 กราฟลักษณะกระแสกับแรงดันขณะเกิดการจำสภาพแม่เหล็ก

2.9 หลักการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกของห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก มีความแตกต่างจากกระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีอื่นมาก เนื่องจากสมมติฐานโครงสร้างมหภาคของตัวนำ

ไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกทำให้มีแนวคิดที่จะสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีโครงสร้างที่ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบเซรามิก เช่นเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ bulk โดยใช้ผงสาร YBCO ที่ทำการเคลือบแล้วมาขึ้นรูปด้วยวิธีการสกรีนสารลงบนฐานรองอลูมินา ซึ่งมีแผ่นสติกเกอร์เป็นหน้าฉาก ผงสารตัวไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการสกรีนจะผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์จนเป็นของเหลวข้น สำหรับแผ่นสติกเกอร์จะถูกลอกออกก่อนที่จะนำแผ่นฟิล์มเข้าเตาเผา แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาเพื่อซินเตอร์ที่ 400 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง วิธีการนี้จะไม่ใช่แรงกดหรืออัดทำให้ฟิล์มที่สร้างขึ้นยึดเกาะกันไม่แข็งแรงเท่ากับชั้นสารแบบอัดเม็ด เนื่องจากความไม่แข็งแรงของการเชื่อมต่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดในฟิล์มหนานี้ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาเป็นหัวข้อสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ สำหรับรายละเอียดวิธีการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนี้จะกล่าวในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ นั้น ได้มีการสร้างโดยการขึ้นรูปสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีลักษณะเป็นเม็คสารแบบเซรามิค ซึ่งกระบวนการสร้างแบบนี้ต้องใช้สารปริมาณมากเพื่อนำมาอัดให้เป็นเม็ค และการทำให้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเม็คสารเปลี่ยนแปลง ต้องทำการปรับเปลี่ยนรูปทรงทางเรขาคณิตของเม็คสารให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยการตะไบเนื้อสารออก ซึ่งถ้าต้องการให้ชั้นสารนั้นมีค่ากระแสสวิกฤติค่าลงต้องตะไบชั้นสารให้มีความหนาน้อยมากๆ และจะต้องระมัดระวังเนื่องจากเม็คสารมีความเปราะทำให้แตกหักได้ง่าย

ดังนั้นกระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ เนื่องจากกระบวนการสร้างง่าย ใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่ายราคาถูก และกระบวนการเตรียมสารไม่ยุ่งยาก คุณสมบัติของชั้นสารจะมีค่ากระแสสวิกฤติต่ำ โครงสร้างของเนื้อสารมีการยึดเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งอธิบายตามลักษณะโครงสร้างมหภาคแล้ว เนื้อสารที่เป็นส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีจุดคอดที่ขาดจากกันได้ง่ายกว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบอัดเม็ค แต่เนื่องจากฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO มีค่ากระแสสวิกฤติค่ามาก ดังนั้นจึงได้เติมสาร ซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ โดยส่วนที่เป็นโลหะนี้จะทำให้เนื้อสารมีการยึดเกาะกันดีขึ้น และยังมีเสถียรภาพในการตอบสนองคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดีกว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ไม่ได้เติมสารซิลเวอร์ออกไซด์ลงไป สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ในการสร้างเป็นฟิล์มหนานี้ใช้สารในตระกูลอิทเรียมที่เติมสารซิลเวอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำการศึกษายู่ในขณะนี้ ดังนั้นจึงเป็นการศึกษาและพัฒนาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มนาชนิด YBCO เป็นการเตรียมสารจากผงสาร ซึ่งเป็นปฏิกิริยาของแข็งจึงต้องใช้วิธีการซินเตอร์ และเนื่องจากเป็นกระบวนการสร้างเป็นแบบฟิล์มหนา ดังนั้นจึงมีอุปกรณ์เพิ่มเติมที่แตกต่างจากการเตรียมสารแบบขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดครั้งนี้ เราจะทำการศึกษาและวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO และสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO+ Ag₂O ดังนั้นสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงประกอบด้วย อิทเทียมออกไซด์ (Y₂O₃) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) และซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag₂O) โดยมีรายละเอียดของสารดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสารแต่ละชนิด

ชื่อสาร	ความบริสุทธิ์	มวล โมเลกุล (กรัม)
(Y ₂ O ₃)	99.99 %	225.81
(BaCO ₃)	99.99 %	197.35
(CuO)	99.99 %	79.54
(Ag ₂ O)	99.99 %	231.72

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มหนา



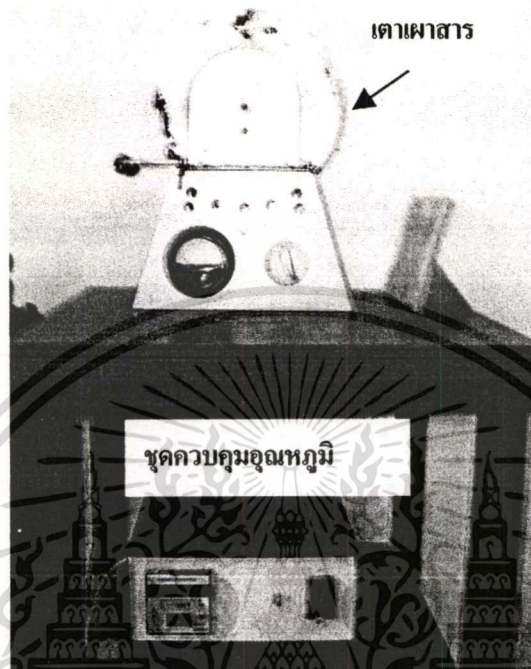
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การเตรียมฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

3.1.3 เตาเผาสารและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Furnance and Temperature control)

เตาเผาสารที่ใช้เป็นเตาเผาควบคุมความร้อนมีท่อเซรามิกทนความร้อนสูงไว้สามารถให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1050 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเตาเผานี้จะต่อเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

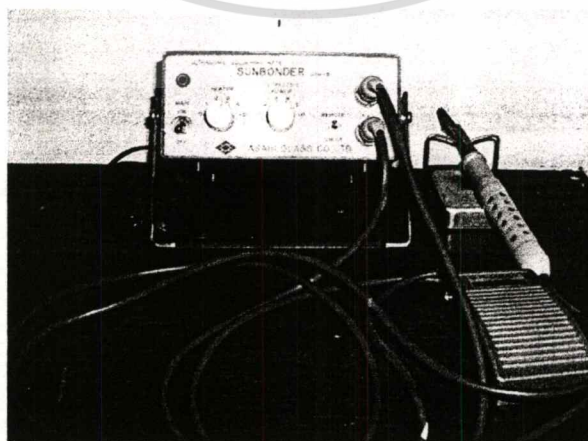
กับชุดควบคุมอุณหภูมิ (Electronic Temperature Controller) ซึ่งใช้ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (type-K) เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -200 ถึง 1300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.2 เตาเผาสารและชุดควบคุมอุณหภูมิ

การทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิคงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON-OFF จากตัวควบคุมไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัดไฟเลี้ยงที่ไปยังขดลวด สำหรับความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิประมาณ ± 20 องศาเซลเซียส

3.1.4 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก



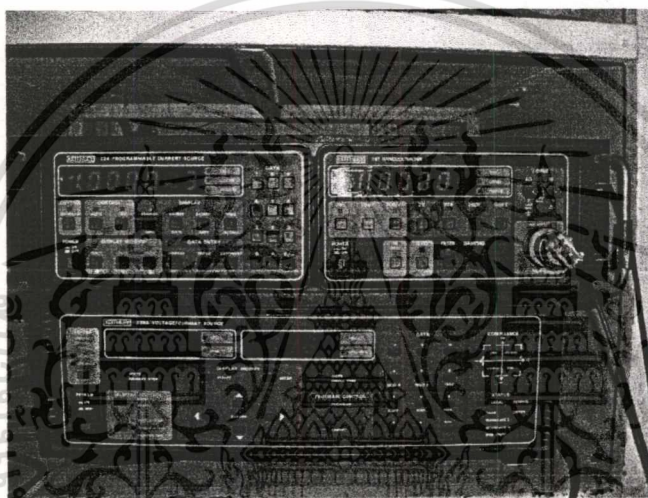
รูปที่ 3.3 ชุดบัคกรีอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดบัคกรีซของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนี้ ประกอบด้วย ตะกั่วผสมอินเดียมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และชุดบัคกรีอัลตราโซนิก ซึ่งการสั่นสะเทือนของหัวบัคกรีนั้นจะทำให้รอยต่อระหว่างเนื้อสารกับตะกั่วผสมอินเดียมยึดติดกันแน่น และมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก

3.1.5 ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source) และนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt meter) ซึ่งสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าต่ำได้ถึง 10 นาโนโวลต์ การวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะต่อเป็นลักษณะของการวัดแรงดันสี่ขั้ว (Four point probe)



รูปที่ 3.4 ชุดเครื่องมือวัดความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

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

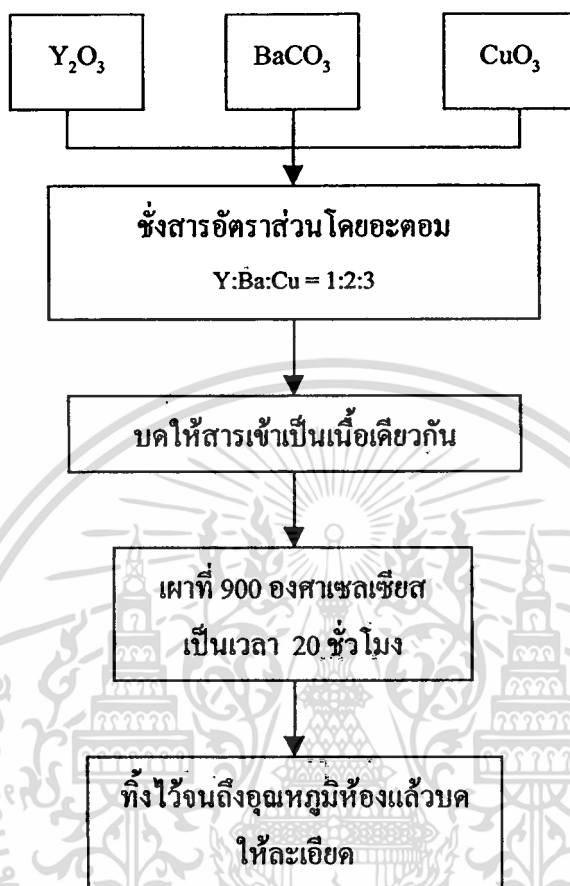
กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสำหรับงานวิจัยนี้ เตรียมจากสารประกอบตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์ 99.9 % ได้แก่ อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีอัตราส่วนโดยอะตอมของธาตุ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 ซึ่งเป็นสารประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตระกูล $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมผงสาร YBCO การเตรียมฐานรอง (Substrate) และการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งในบางขั้นตอนจะเหมือนกับการเตรียมสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูปที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ศึกษาวิจัยอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเตรียมผงสาร YBCO

ขั้นตอนนี้สามารถสรุปเป็นแผนผัง ได้ดังรูปที่ 3.5



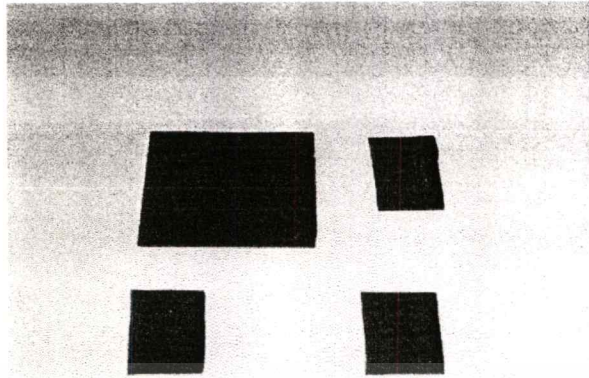
รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

การเผาในขั้นตอนนี้เรียกว่า แคลซิเนชัน (Calcination) ซึ่งต้องทำการแคลซิเนตซ้ำอีกหนึ่งครั้ง สารประกอบที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ YBCO เป็นผงละเอียดสีดำ

3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรอง

แผ่นฐานรองที่ใช้เป็นแผ่นอลูมินา (Al_2O_3) มีความหนา 0.6 มิลลิเมตร นำไปทำความสะอาดโดยแช่ทิ้งไว้ในอะซิโตนประมาณ 5 นาที แล้วนำออกมาผึ่งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผงสาร YBCO ที่แคลซิเนตแล้วในขั้นตอนแรกมาผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ จนเป็นของเหลวข้นหนาทาบางๆ ลงบนแผ่นอลูมินา ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 10 นาที แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นตัวลง สาร YBCO จะหลอมติดกับแผ่นอลูมินาดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะช่วยให้ฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะสร้างขึ้นในขั้นตอนต่อไป ยึดติดกับฐานรองได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



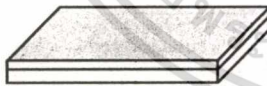
รูปที่ 3.6 ลักษณะของแผ่นฐานรองที่เตรียมแล้ว

3.2.3 การสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO

กระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ใช้วิธีการสกรีน โดยใช้แผ่นสติกเกอร์ติดทับลงบนแผ่นฐานรองที่เตรียมไว้แล้ว เพื่อใช้เป็นหน้ากาก (Mask) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นเปิดช่องตามขนาดที่ต้องการ



แผ่นอะลูมินาที่เตรียมผิวรองรับแล้ว



ติดแผ่นสติกเกอร์บนแผ่นอะลูมินา



เปิดช่อง แล้วลอกสติกเกอร์ออก



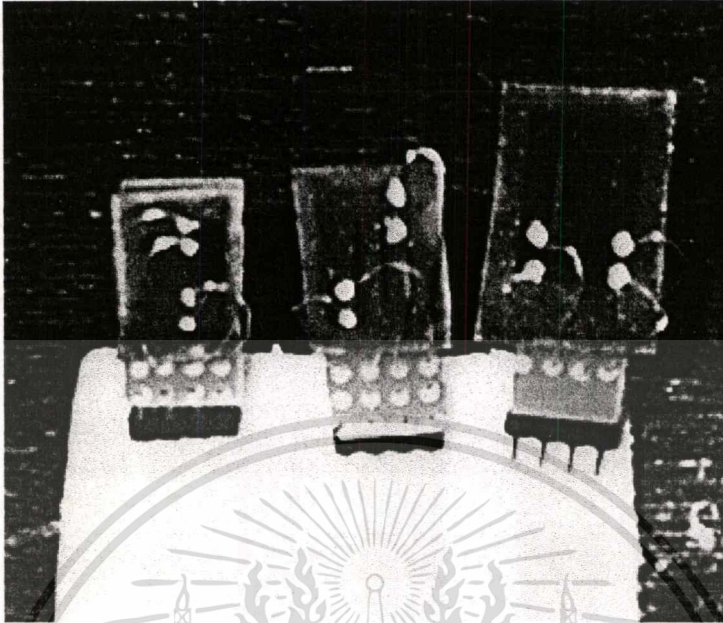
สกรีนสารลงในช่องที่เปิดไว้



ลอกสติกเกอร์ด้านข้างออก จากนั้นนำไปเผาที่ 900°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง อบที่ 400°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



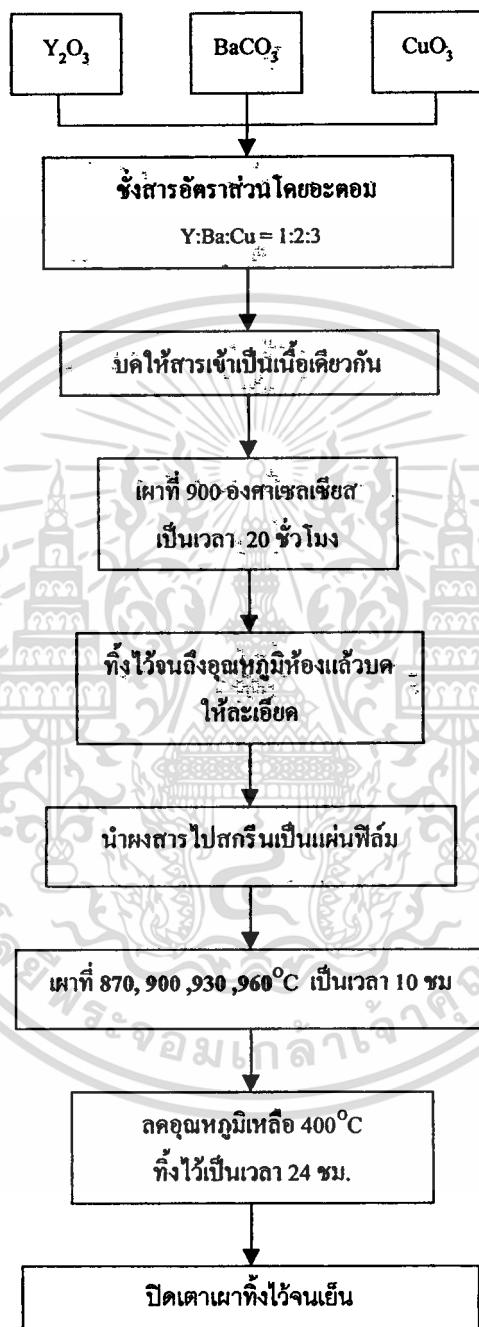
รูปที่ 3.8 ลักษณะของฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก

จากนั้นนำผงสาร YBCO ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ ผสมกันจนเป็นของเหลวข้นนำไป สกรีนลงในช่องที่เปิดไว้ แล้วลอกสติ๊กเกอร์ด้านข้างออก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงเป็น 400 องศาเซลเซียส อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้จนถึงอุณหภูมิห้อง

3.3 การทดลองหาอุณหภูมิการเผาฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้ายิ่งยวด

กระบวนการสร้างฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้ายิ่งยวดยุคนั้นมีขั้นตอนย่อยๆ 3 ขั้นตอนด้วยกัน โดยมีขั้นตอนคือ การเตรียมผงสาร การเตรียมแผ่นฐานรอง การสร้างฟิล์มหนา สำหรับขั้นตอนการเตรียมผงสารนั้นจะใช้กระบวนการเคียวกับการเตรียมผงสารของการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ อัดเม็ด ส่วนกระบวนการสร้างฟิล์มหนานั้นจะทำการศึกษาหาอุณหภูมิในขั้นตอนนี้ เนื่องจากเนื้อ สารต้องเกาะอยู่บนฐานรองอลูมินา และชิ้นสารยังมีลักษณะเป็นฟิล์ม ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา สำหรับขั้นตอนนี้ต้องมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง จึงจะทำให้ฟิล์มหนาที่สร้างขึ้นสามารถยึดเกาะ กับฐานรองได้ดี และมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ขั้นตอนในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขั้นตอนของการสร้างฟิล์มหนา โดยเผาที่อุณหภูมิต่างๆคือ 870°C , 900°C , 930°C , 960°C ซึ่งมีขั้นตอนกระบวนการสร้างดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้าช่วงที่อุณหภูมิ 870, 900, 930 และ 960°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

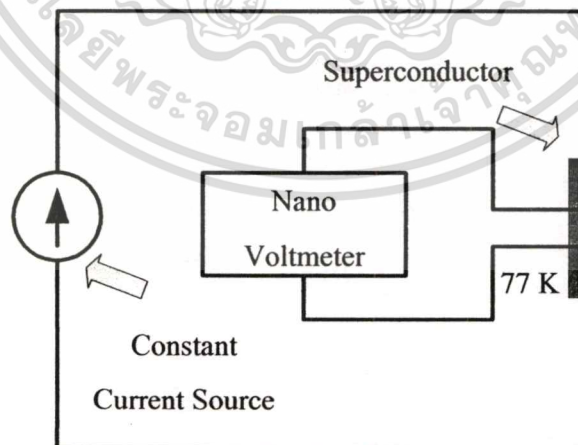
เมื่อสามารถหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสร้างฟิล์มหนาได้แล้ว จากนั้นจะนำฟิล์มหนาที่สร้างได้มาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อแสดงว่าฟิล์มหนาที่สร้างขึ้นมานั้นมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยทดสอบการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน และคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

3.4.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

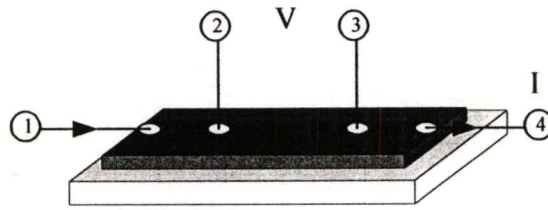
ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์เป็นปรากฏการณ์พื้นฐานที่เกิดขึ้นกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งทดสอบโดยการนำแผ่นฟิล์มหนาคออุณหภูมิจนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (93 K) ในไนโตรเจนเหลว (77 K) จากนั้นนำแม่เหล็กขนาดเล็กลงบนแผ่นฟิล์มหนา แม่เหล็กจะถูกผลักให้ลอยเหนือแผ่นฟิล์ม ถ้าฟิล์มหนาที่สร้างขึ้นเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดัน

การทดสอบคุณสมบัตินี้เป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) และวัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารด้วยนาโนโวลต์มิเตอร์ (Nanovolt Meter) ลักษณะของการต่อขั้วบัดกรีกับชิ้นสารแสดงในรูปที่ 3.11 โดยทำการทดลองวัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันที่อุณหภูมิห้อง (สภาพตัวนำไฟฟ้าธรรมดา) และที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด)



รูปที่ 3.10 วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดัน

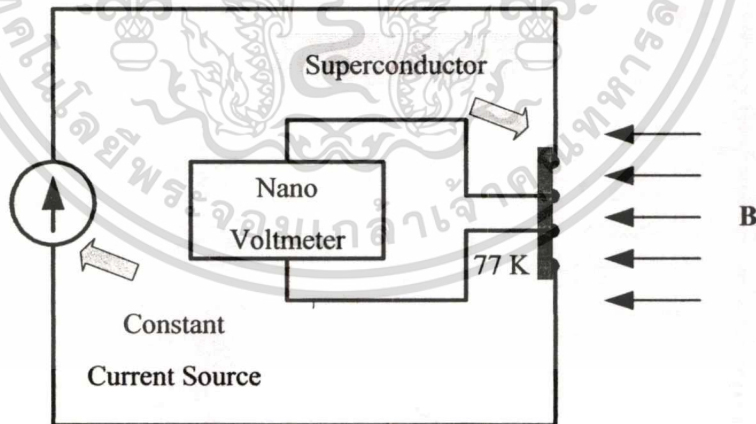


รูปที่ 3.11 ลักษณะการต่อขั้ววัดกรีกับชิ้นสาร

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะแสดงให้เห็นว่าในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด แรงดันตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเป็นศูนย์ที่กระแสไบอัสต่ำกว่ากระแสวิกฤต ซึ่งต่างจากตัวนำไฟฟ้าแบบธรรมดาซึ่งมีค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตั้งแต่เริ่มให้ไบอัสกระแส

3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ ซึ่งพบว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปบางส่วน ดังนั้นค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความต้านทานของชิ้นสารมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 3.12 ลักษณะวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก

สำหรับวงจรในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 3.12 วงจรนี้ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกโดยใช้แท่งแม่เหล็กถาวร ที่ได้ทำการสอบเทียบค่าสนามแม่เหล็กแล้ว ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

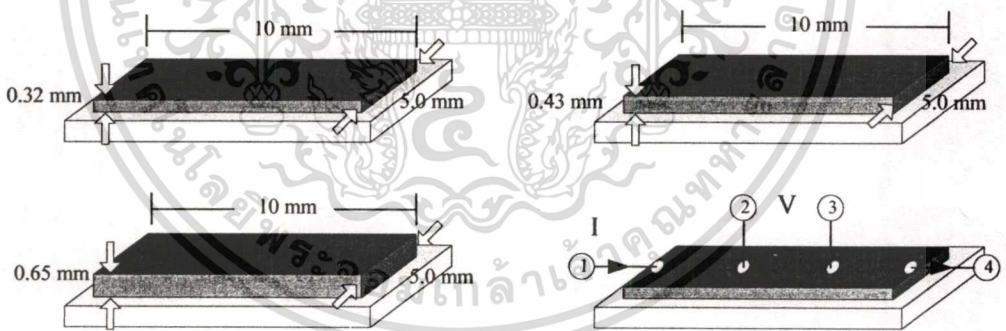
ทดลองนี้จะทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ และขณะที่สนามแม่เหล็กภายนอกที่ค่าๆ

3.5 การทดลองผลของขนาดและลวดลายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอก

เนื่องจากต้องการให้การออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่ดีที่สุด จึงต้องทำการศึกษาถึงขนาดและลวดลายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ว่ามีผลเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อความหนา ความกว้าง ความยาว และลวดลาย ของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป

3.5.1 การทดลองที่ความหนาต่างค่าต่างๆ (T)

ในการทดลองจะสร้างฟิล์มตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีความหนาแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ขนาดความกว้าง และความยาวคงที่ ซึ่งขนาดของฟิล์มเป็น 0.5×1.0 ตารางเซนติเมตร ส่วนความหนาของชั้นสารกำหนดให้มีความแตกต่างกัน 3 ค่าด้วยกันคือ 0.32 , 0.43 และ 0.65 มิลลิเมตร (เนื่องจากความหนาต่ำสุดที่สร้างได้คือ 0.32 มิลลิเมตร และความหนาสูงสุดประมาณ 0.65 จึงทำให้กำหนดค่าความแตกต่างกันเพียง 3 ค่าเท่านั้น) ดังแสดงในรูปที่ 3.13

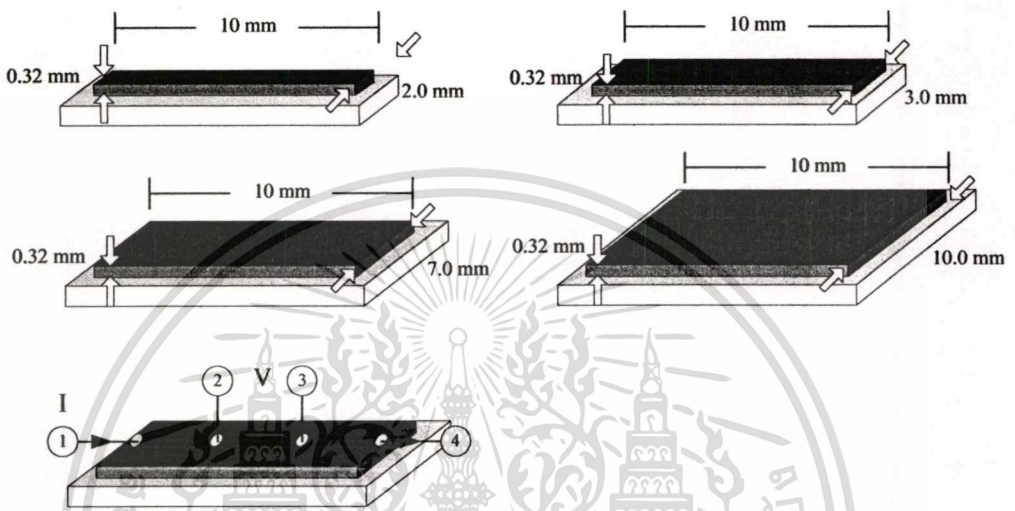


รูปที่ 3.13 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชั้นสารฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความหนาต่างค่าๆ

การวัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารจะต่อขั้ววัดแรงดันห่างกันเป็นระยะ 0.3 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยวัดแรงดันตกคร่อมชั้นสารระหว่างขั้ว 2 และขั้ว 3 ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ในอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ทำการบันทึกผลแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

3.5.2 การทดลองที่ความกว้างค่าต่างๆ (W)

การทดลองนี้จะเปลี่ยนความกว้างของชิ้นสาร โดยกำหนดให้ขนาดความยาวและความหนาคงที่ กำหนดให้ฟิล์มมีความหนา 0.32 มิลลิเมตร และมีความยาว 10 มิลลิเมตร สำหรับขนาดความกว้างกำหนดให้มีความแตกต่างกัน 4 ค่าคือ 0.2 , 0.3 , 0.7 และ 1.0 เซนติเมตร ดังรูปที่..

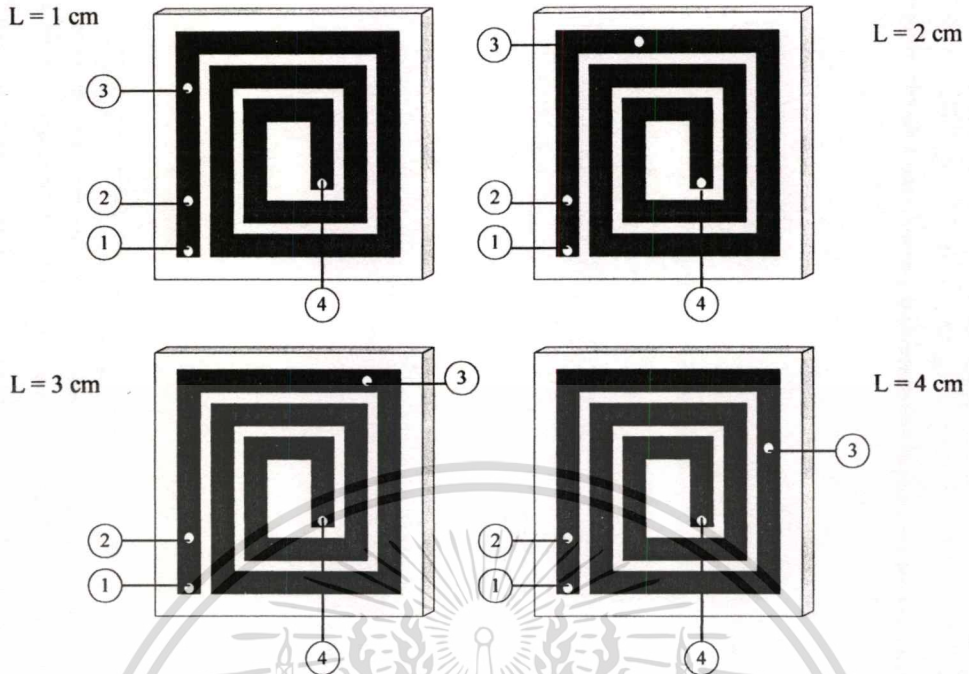


รูปที่ 3.14 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้าที่ยึดที่ความกว้างค่าต่างๆ

การต่อขั้วเพื่อวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร จะต่อระหว่างขั้ว 2 กับขั้ว 3 ห่างกัน 0.3 เซนติเมตรเท่ากันทุกชิ้นงาน จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ขณะให้สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ทำการบันทึกผลแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

3.5.3 การทดลองที่ความยาวค่าต่างๆ (L)

การทดลองนี้จะเปลี่ยนแปลงค่าความยาวยาวของชิ้นสาร โดยกำหนดขนาดความกว้างและความหนาคงที่ กำหนดให้มีความหนา 0.32 มิลลิเมตร และมีความกว้าง 2.0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15



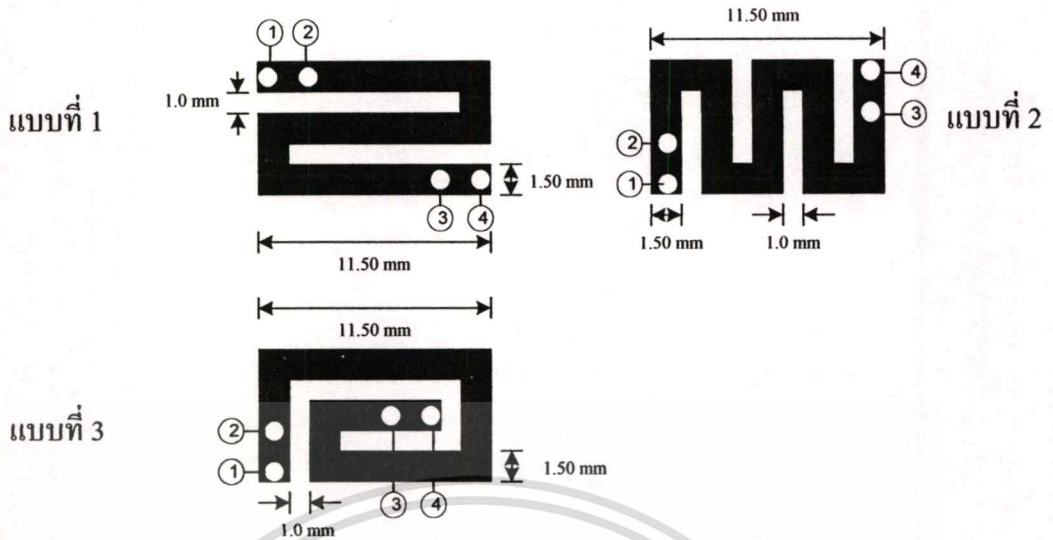
รูปที่ 3.15 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วขึ้นสารฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้าที่ยาววัดที่ค่าความยาวต่างๆ

สำหรับความยาวของการต่อขั้ววัดแรงดันตกคร่อมขึ้นสาร 4 ค่า คือ 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ทำการบันทึกผลแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

3.5.4 การทดลองที่ลวดลายแบบต่างๆ

การทดลองนี้มีการเปลี่ยนแปลงลวดลายของฟิล์มหนา 3 แบบด้วยกันดังรูปที่ 3.16 โดยกำหนดให้ความหนาและระยะห่างของการต่อขั้ววัดแรงดันตกคร่อมเท่ากันทุกรูปแบบ โดยมีความหนา 0.32 มิลลิเมตร ความยาวระหว่างการวัดขั้วแรงดันตกคร่อมขึ้นสารเท่ากับ ลวดลายที่ออกแบบนั้นจะมีลักษณะขดไปมาในขนาดและขอบเขตที่เท่ากันทั้ง 3 แบบ

การทดลองจะวัดค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารทั้ง 3 แบบ เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ทำการการบันทึกผลแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน



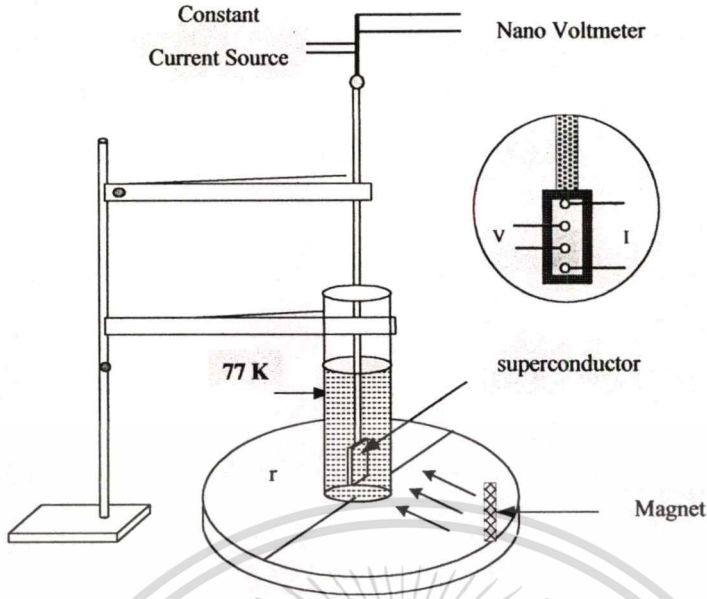
รูปที่ 3.16 ขนาดและลักษณะการต่อขั้วชิ้นสารฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดที่ลวดลายต่างๆ

3.6 การทดลองผลของทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสนามแม่เหล็กมักใช้หลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าหรือปรากฏการณ์ของฮอลล์ ซึ่งผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นในทิศตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแส ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ทุกทิศทางสำหรับตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดนั้นสามารถที่จะตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอกได้ทุกทิศทาง จึงเป็นข้อดีสำหรับใช้วัดสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับการทดลองนี้จะใช้ฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดซึ่งมีขนาดของชิ้นสารแตกต่างกัน

ขั้นตอนการทดลอง

- นำฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดมาติดตั้งกับชุดวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กกับทิศทางดังรูปที่ 3.17 โดยทดลองกับชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$ (กว้าง x ยาว x หนา) และขนาด $1.2 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$
- ให้กระแสคงที่กับชิ้นสารเท่ากับ 0.1 mA
- เลื่อนแท่งแม่เหล็กเข้าใกล้ฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดที่ตำแหน่งค่าสนามแม่เหล็ก 1.30 เกาส์
- หมุนแท่งแม่เหล็กรอบฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้าที่ยึดยึดจาก 0° - 360° โดยรักษาตำแหน่งของค่าสนามแม่เหล็กให้คงที่ วัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร บันทึกผล
- ทำการทดลองในข้อ 4 ซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กเป็น 2.67 เกาส์ และ 5.81 เกาส์ ตามลำดับ วัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร บันทึกผล

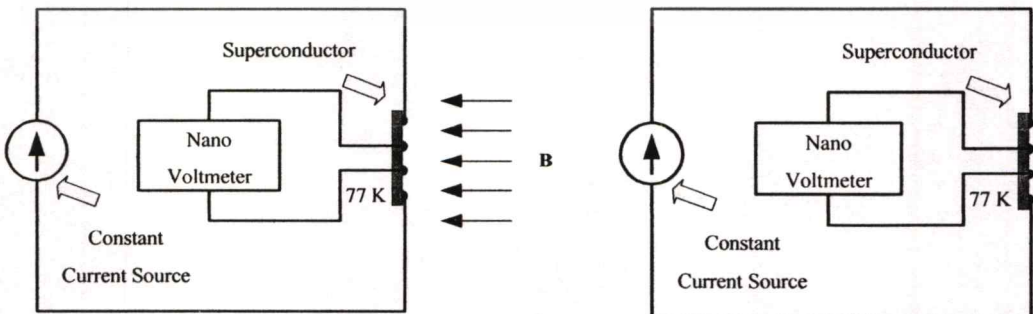


รูปที่ 3.17 การทดลองวัดคุณสมบัติกระแสกับแรงดันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

6. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟเชิงขั้ว

3.7 การทดลองการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้ายิ่งยวด

การจำสภาพแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกนั้น จะเกิดขึ้นเมื่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกกระทำจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสนามแม่เหล็กสูงๆ ซึ่งเมื่อเกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้นจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กคก้างในเนื้อสาร จึงเกิดแรงดันคกร้อมขึ้นสารขึ้นมากกว่า ก่อนให้สนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้นหากเกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้นในหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก็จะทำให้การวัดสนามแม่เหล็กไม่ถูกต้องได้ จึงกำหนดให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เริ่มทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก เป็นค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่สามารถวัดได้จากหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



ก. ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก

ข. หลังจากเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออก

รูปที่ 3.18 วงจรวัดคุณสมบัติการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหนาดำนำไฟฟ้ายิ่งยวด

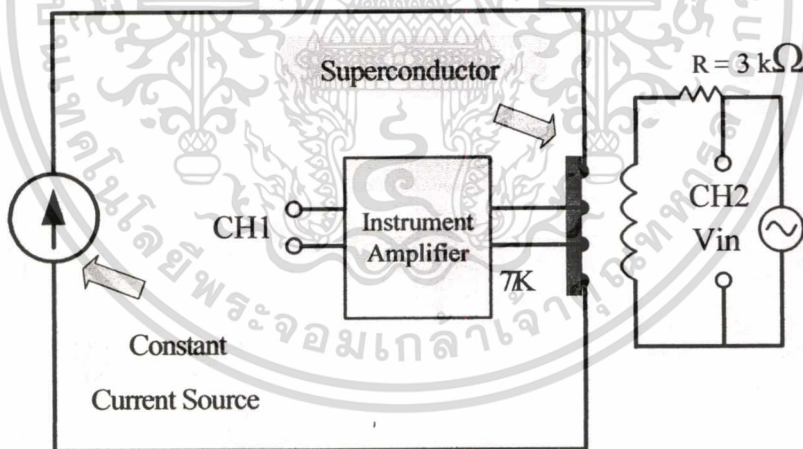
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการจำสภาพแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 3.18 โดยให้กระแสไบอัสกระแสกับชิ้นสาร 0.1 mA ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำการวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่เริ่มให้กับชิ้นสาร จะเป็นค่าต่ำสุดที่ฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มมีการตอบสนอง จากนั้นนำสนามแม่เหล็กภายนอกออกแล้ววัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร ทำการทดลองต่อไปโดยให้ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้น แล้ววัดค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขณะให้สนามแม่เหล็กและหลังจากนำสนามแม่เหล็กภายนอกออก บันทึกผลการทดลอง

3.8 การทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ

จากการที่ได้มีการศึกษาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบขึ้นรูปแล้วนั้น พบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับได้ ดังนั้นในการทดลองนี้ จะทำการทดลองกับฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก ซึ่งแสดงผลด้วยฮอสซิลโลสโคป และใช้วงขยายสัญญาณต่อเข้ากับเอาต์พุทของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดดังรูปที่ 3.19 โดยวัดค่าแรงดันอินพุทที่ให้ผ่านขดลวด (L) ทางแชนแนล 1 และวัดแรงดันเอาต์พุททางแชนแนล 2



รูปที่ 3.19 วงจรที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ

3.8.1 การทดลองที่ค่าแรงดันอินพุทค่าต่างๆ

ในการทดลองนี้จะทดลองที่ค่าแรงดันอินพุทที่ให้กับขดลวดจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ค่าต่าง ๆ คือ 2, 3, 5, 10 โวลต์ ที่ความถี่ถึงที่ 80 Hz และให้กระแสไบอัสกับชิ้นสารคงที่ 10 mA กับชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$ อัตราการขยาย 80 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

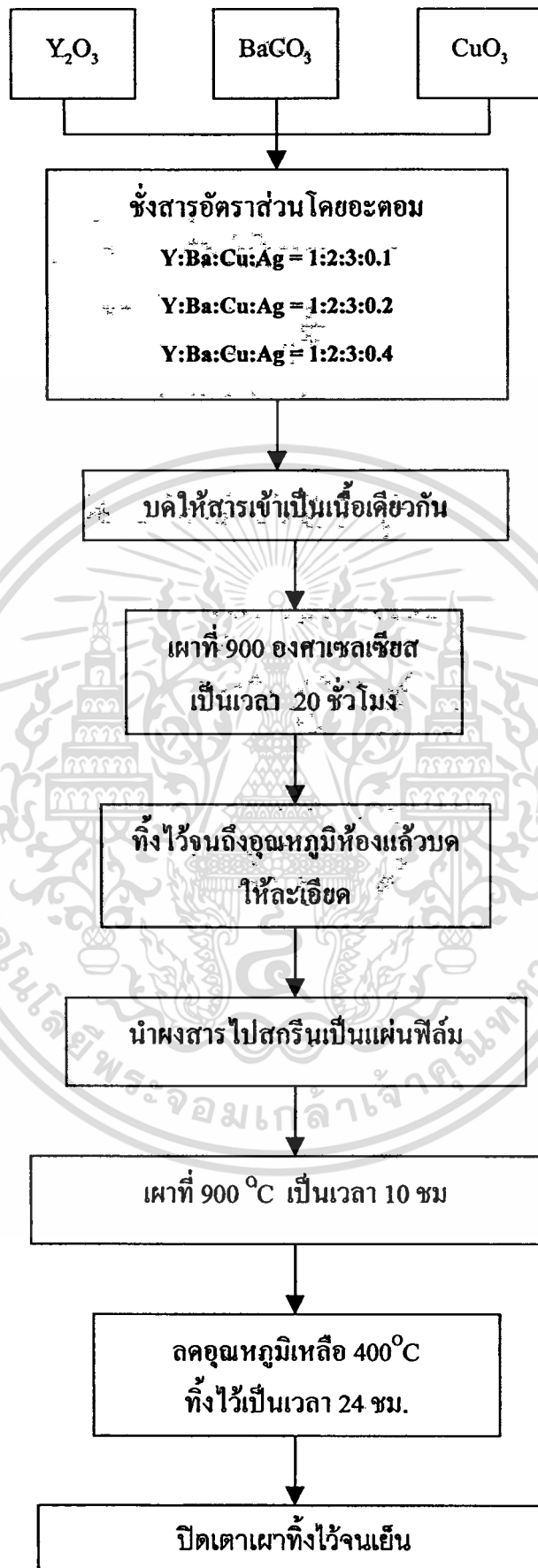
3.8.2 การทดลองที่ค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตค่าต่างๆ

การทดลองนี้จะให้ค่าแรงดันอินพุตกับขดลวด เปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตเป็น 50, 1000, 2000, 3000 Hz ตามลำดับ และให้กระแสไบอัสกับชิ้นสารคงที่ 10 mA กับชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$ อัตราการขยาย 80 เท่า

3.9 การทดลองผลของการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

การเจือสารลงในสารประกอบตั้งต้นจะทำให้คุณสมบัติของสารมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงมีการทดลองเจือสารต่างๆ ลงในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหลายชนิดด้วย ซึ่งจากที่ได้มีการศึกษาการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ลงในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าคุณสมบัติบางอย่างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเปลี่ยนไป ดังนั้นในการทดลองนี้จึงนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO มาเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์เพื่อนำมาศึกษาผลการตอบสนองสนามแม่เหล็ก สำหรับการทดลองจะทำการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 0.1, 0.2 และ 0.4 โดยอะตอม ขั้นตอนของการเตรียมผงสารจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO โดยมีขั้นตอนดังแผนผังในรูปที่ 3.20 ซึ่งผงสารที่ได้จะนำมาสร้างเป็นแผ่นฟิล์มหนาตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาข้างต้น

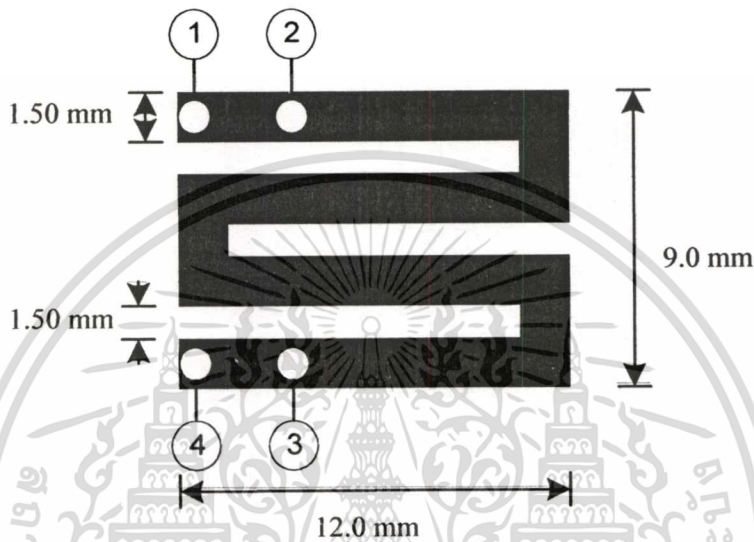
สำหรับแผ่นฟิล์มหนาจะสร้างให้มีขนาด ความกว้าง 0.5 เซนติเมตร ความยาว 1.0 เซนติเมตร และความหนา 0.32 มิลลิเมตร การต่อขั้วบัคกรีวดแรงดันคกร้อมชิ้นสารมีระยะห่างระหว่างขั้ว 0.3 มิลลิเมตร ทำการทดลองวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันที่อัตราส่วนของการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิใน ไตรเจนเหลว โดยให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ ทำการบันทึกผลการทดลองแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน



เอกสารรูปที่ 3.20 แผนผังการเตรียมฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กของหัวสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบ

ในการทดลองนี้เป็นผลมาจากการทดลองเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพที่ได้ทำการทดลองในหัวข้อ 3.51, 3.52, 3.53 และ 3.54 โดยจากผลการทดลองที่ได้ทดลองมาทั้งหมด ทำให้สามารถออกแบบลักษณะของหัววัดสนามแม่เหล็กให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งมีขนาดและลวดลายดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ลักษณะลวดลายของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ออกแบบ

ในการทดลองจะทำการวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันขณะให้สนามแม่เหล็กแบบคงที่ค่าต่างๆ และวัดคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับเพื่อยืนยันความสามารถของการใช้วัดสนามแม่เหล็กแบบคงที่และแบบสลับ โดยมีผลการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.5 และหัวข้อ 3.8

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการหาอุณหภูมิการเผาฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO

จากการทดลองหาอุณหภูมิการเผาฟิล์มหนาชนิด YBCO ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มหนาที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด YBCO	ปรากฏการณ์ ไมส์เนอร์
870	เนื้อสารยึดติดบนฐานรองไม่แข็งแรง	เกิด
900	เนื้อสารยึดติดแน่นกับฐานรอง	เกิด
930	เนื้อสารเริ่มหลอมบางส่วน ขนาดของฟิล์มไม่คงเดิม	เกิด
960	เนื้อสารหลอมติดกับแผ่นฐานรอง ไม่เป็นแผ่นฟิล์ม	ไม่เกิด

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลการทดลองที่แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มหนาที่อุณหภูมิการเผาต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 900 °C มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นอุณหภูมิการเผาแผ่นฟิล์มหนา เนื่องจากเนื้อสารยึดติดแน่นกับฐานรอง แล้วยังแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ สำหรับที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 900 °C เนื้อสารไม่สามารถยึดติดแน่นกับฐานรอง ส่วนที่อุณหภูมิ 930 °C และ 960 °C เนื้อสารเริ่มหลอมและหลอมติดกับฐานรองตามลำดับ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิการเผาที่ 900 °C เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบสกรีน

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

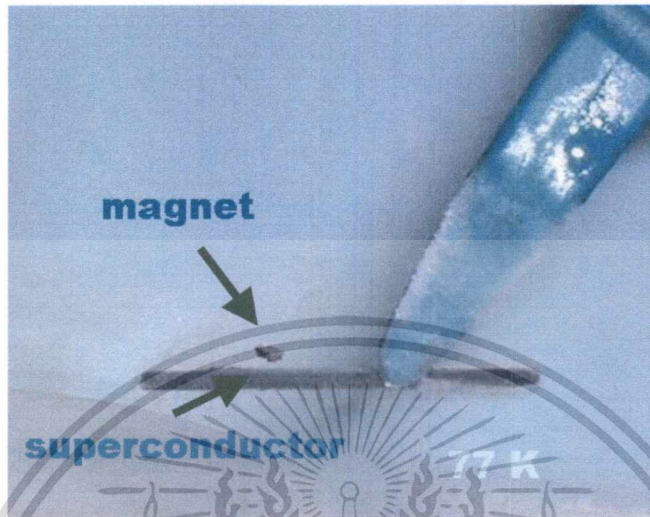
หลังจากพบอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมกับการสร้างฟิล์มหนาแล้ว ก็จะนำฟิล์มหนาที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นการยืนยันว่าฟิล์มหนาที่สร้างได้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

จากการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO พบว่า ฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

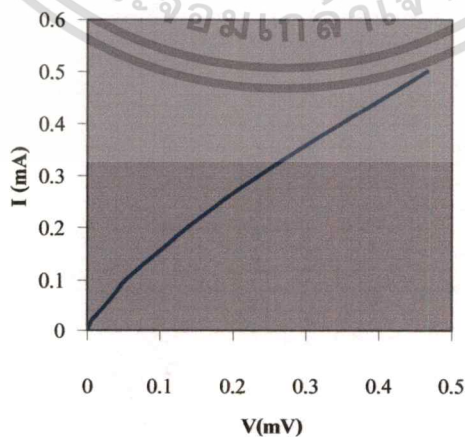
จะเห็นว่าชิ้นแม่เหล็กขนาดเล็กสามารถลอยอยู่บนแผ่นฟิล์มหนาได้ จึงเป็นการยืนยันคุณสมบัติการเป็นไดอาแมกเนติกของฟิล์มหนาด้วย



รูปที่ 4.1 ปรางูการณ์ไมส์เนอร์ของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

4.2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดัน

จากผลการทดลองวัดคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดัน จะเห็นว่าค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนามีค่าต่ำมาก ประมาณ $20 \mu\text{A}$ (จากข้อมูลที่เป็นตัวเลข) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าจุดคอดที่เป็นส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดยึดติดกันอย่างหลวมๆ และมีความต้านทานสูงมากกว่าชิ้นสารแบบชิ้นรูป

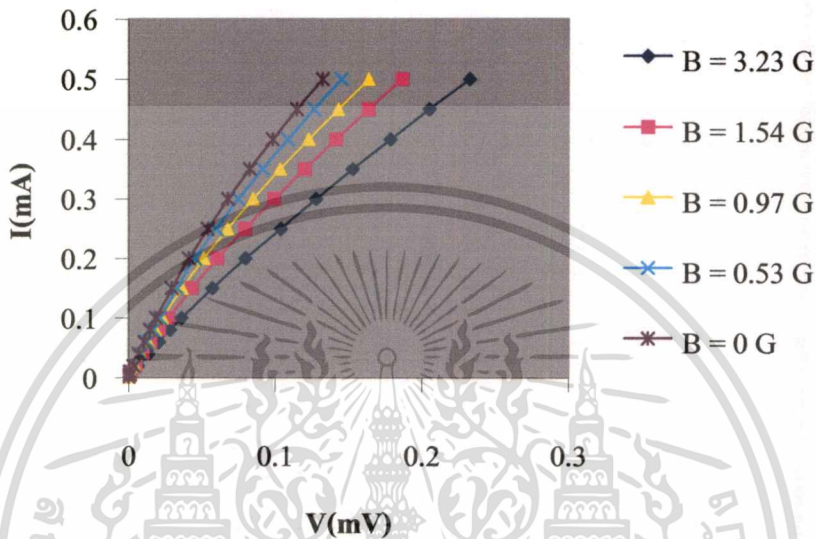


รูปที่ 4.2 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็ก

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 พบว่ากราฟระหว่างกระแสกับแรงดันของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก 0.53 เกาส์ มากำทำซึ่งที่ค่ากระแสไอฮัสคองที่ค่าหนึ่งจะเห็นว่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

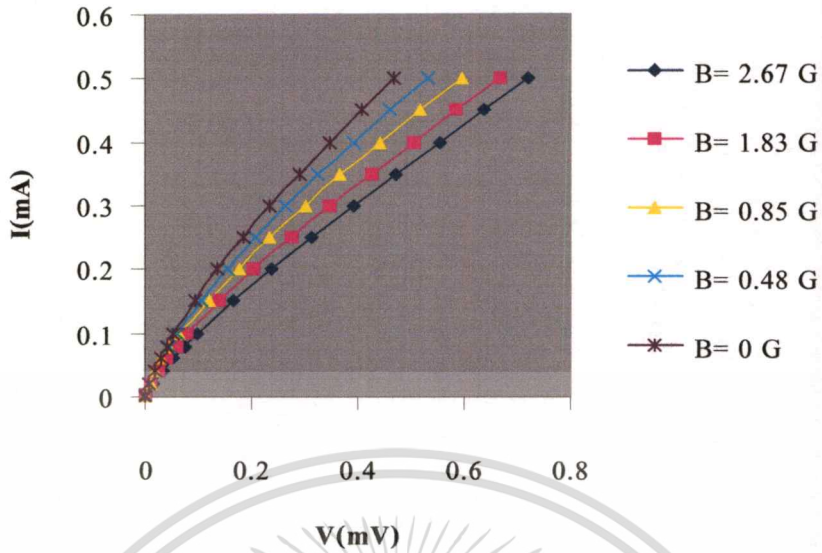
สรุปได้ว่าฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ เช่นเดียวกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูปที่ได้มีการศึกษามาแล้ว และสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่า 1 เกาส์

4.3 ผลการทดลองผลของขนาดและลวดลายของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอก

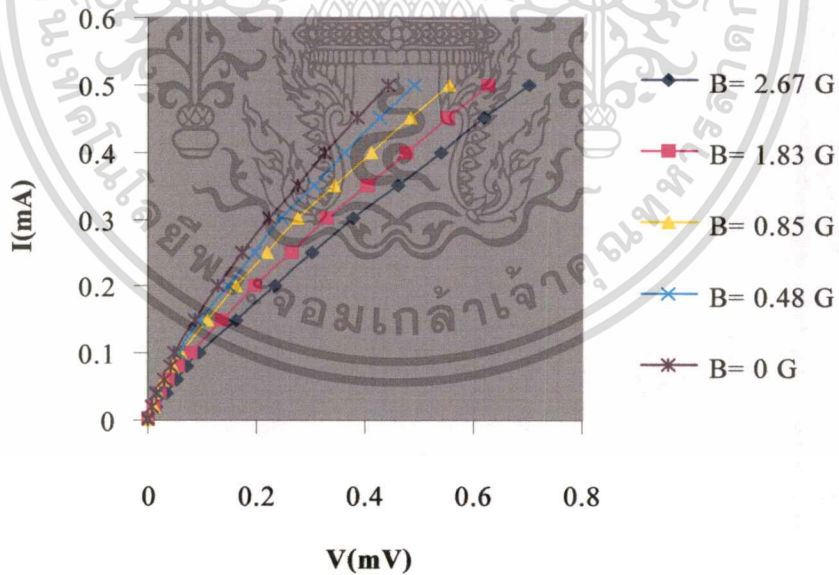
4.3.1 ผลการทดลองที่ความหนาต่างๆ (T)

จากกราฟรูปที่ 4.4 เป็นผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ความหนา 0.32 มิลลิเมตร และในรูปที่ 4.5 , 4.6 เป็นผลการทดลองที่ความหนา 0.43 และ 0.65 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมชั้นสารขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง มีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นสารมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

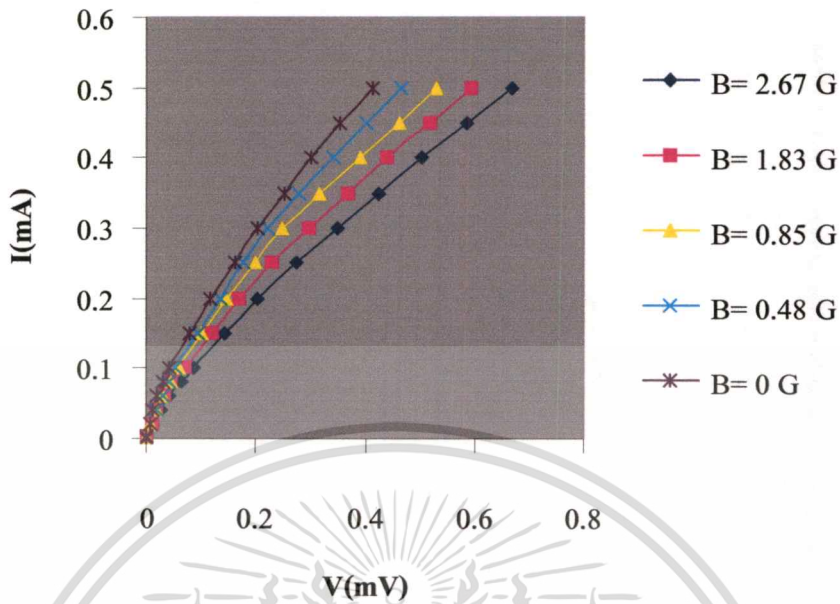


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่มีความหนา 0.32 mm ที่สนามแม่ภายนอกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่มีความหนา 0.43 mm ที่สนามแม่ภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

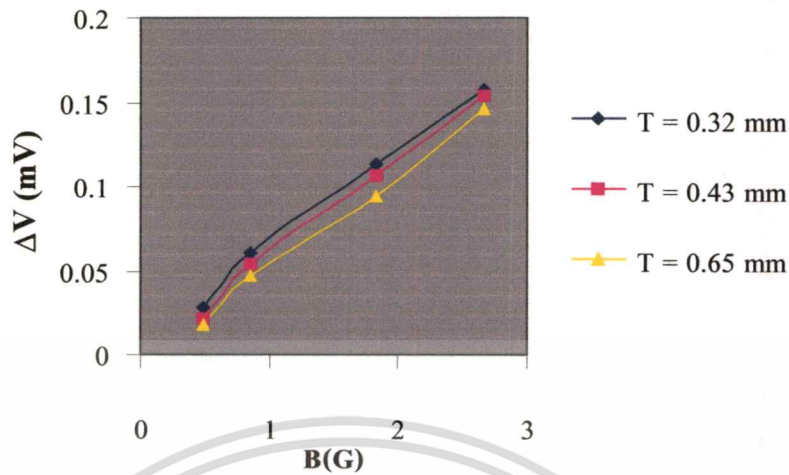


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความหนา 0.65 mm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

ถ้าพิจารณาที่กระแสไบอัส 0.5 mA ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก 2.67 เกาส์ ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ความหนา 0.32 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 0.72 mV แต่ชิ้นสารที่มีความหนา 0.43 มิลลิเมตรและ 0.65 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเท่ากับ 0.70 และ 0.67 mV ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔV กับ สนามแม่เหล็กภายนอก B โดยค่า ΔV คือค่าความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ กับที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 พบว่าค่า ΔV ที่ความหนาของชิ้นสาร 0.32 มิลลิเมตรมีค่าสูงกว่า ค่า ΔV ของชิ้นสารที่มีความหนา 0.43 และ 0.65 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นสารมีความหนาน้อยลง ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะมีค่าสูงขึ้น

สำหรับในกรณีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มหนาดัชนีไฟฟ้าเชิงขั้วแบบเซรามิกนี้สามารถทำได้ในช่วงที่แคบเนื่องจากกระบวนการสร้างที่มีลักษณะเฉพาะตัว ทำให้สามารถสร้างฟิล์มหนาดัชนีไฟฟ้าเชิงขั้วที่มีความหนาน้อยสุดได้เพียงประมาณ 0.32 มิลลิเมตรเท่านั้น และการสร้างให้ชิ้นสารมีความหนาเพิ่มขึ้นยังก่อให้เกิดปัญหาการยึดติดกับฐานรองอีกด้วย แต่ปัจจัยดังกล่าวนี้ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก จึงไม่ได้เป็นปัญหาสำคัญกับการพิจารณาในเรื่องของความหนาของชิ้นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

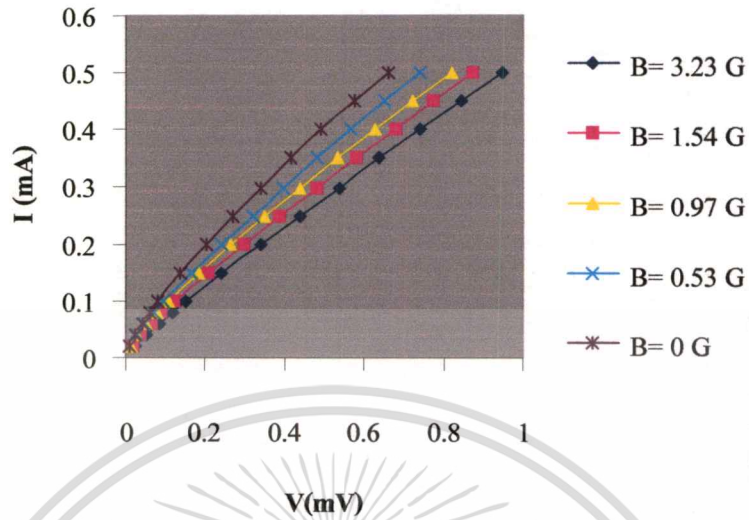


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความหนาต่าง ๆ

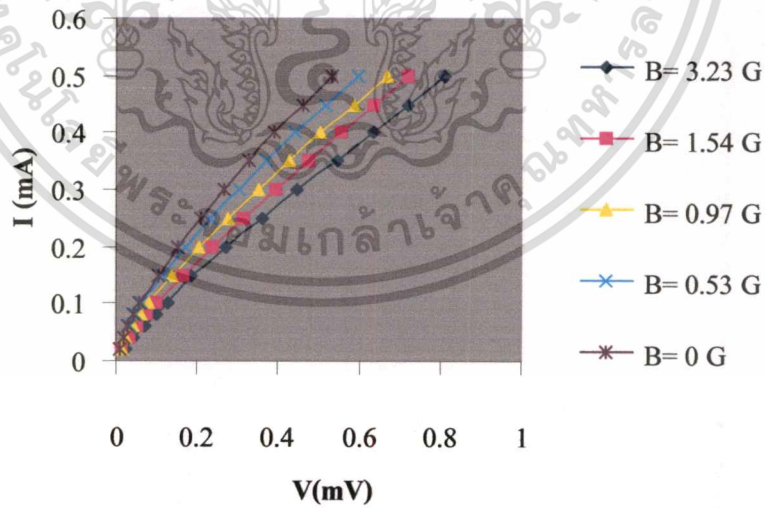
4.3.2 ผลการทดลองที่ความกว้างค่าต่างๆ (W)

จากการทดลองผลของความกว้างของฟิล์มหนาได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11 เป็นผลการทดลองที่ความกว้างของชิ้นสาร 0.2, 0.3, 0.7 และ 1.0 เซนติเมตร พบว่าเมื่อความกว้างของชิ้นสารกว้างมากขึ้น ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง มีค่าลดลง

ถ้าพิจารณาที่กระแสไบอัสคงที่ 0.5 mA ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก 3.23 เกาส์ ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ความกว้าง 0.2 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.95 mV แต่ชิ้นสารที่มีความกว้าง 0.3, 0.7 และ 1.0 เซนติเมตร มีค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเท่ากับ 0.81, 0.24 และ 0.21 mV ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔV กับ สนามแม่เหล็กภายนอก B โดยค่า ΔV คือค่าความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ กับที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่า ΔV ที่ความกว้างของชิ้นสาร 0.2 เซนติเมตรมีค่าสูงกว่าค่า ΔV ของชิ้นสารที่มีความกว้าง 0.3, 0.7 และ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นสารมีความกว้างมากขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะมีค่าน้อยลง

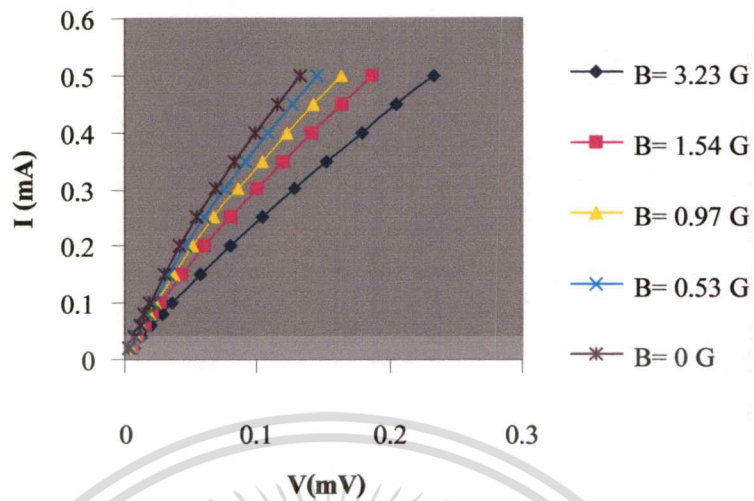


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.2 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

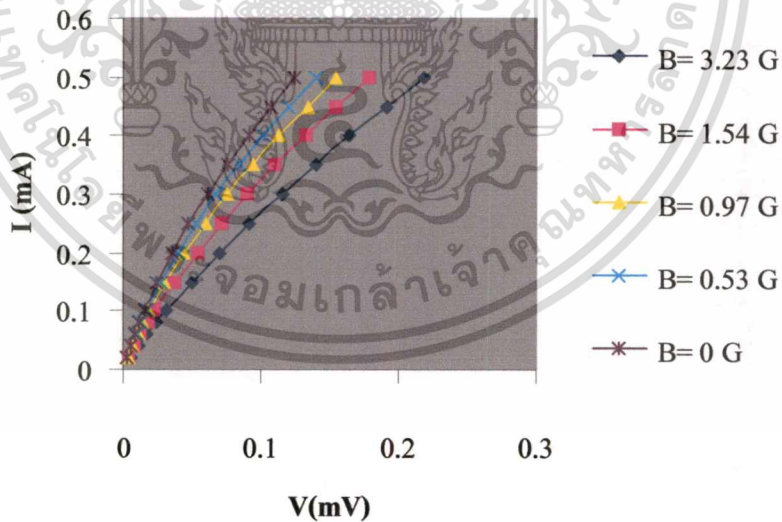


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.3 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

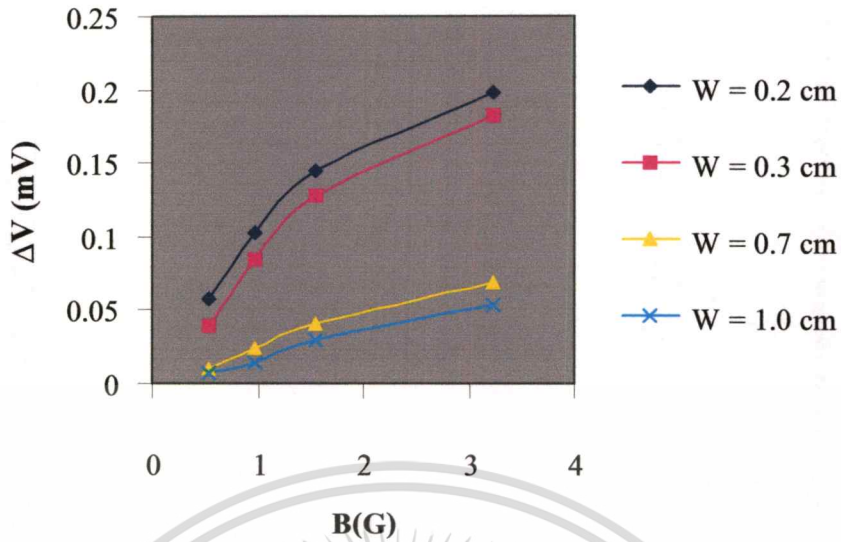


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 0.7 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความกว้าง 1.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

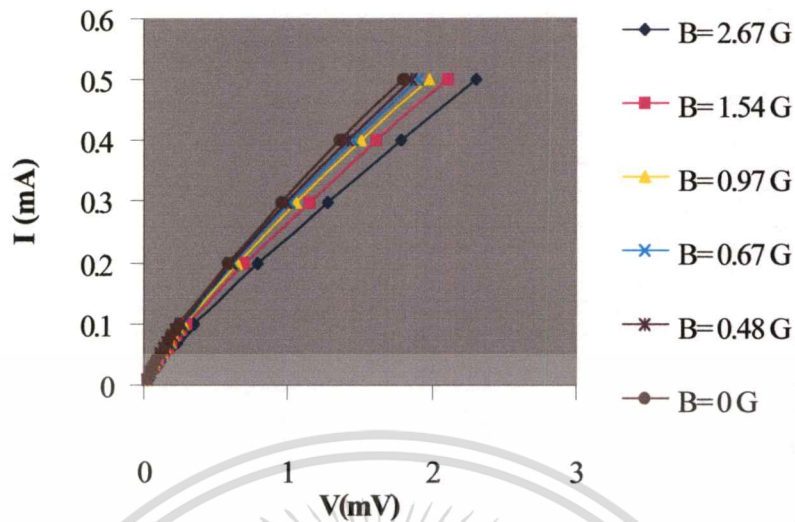


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความกว้างค่าต่างๆ

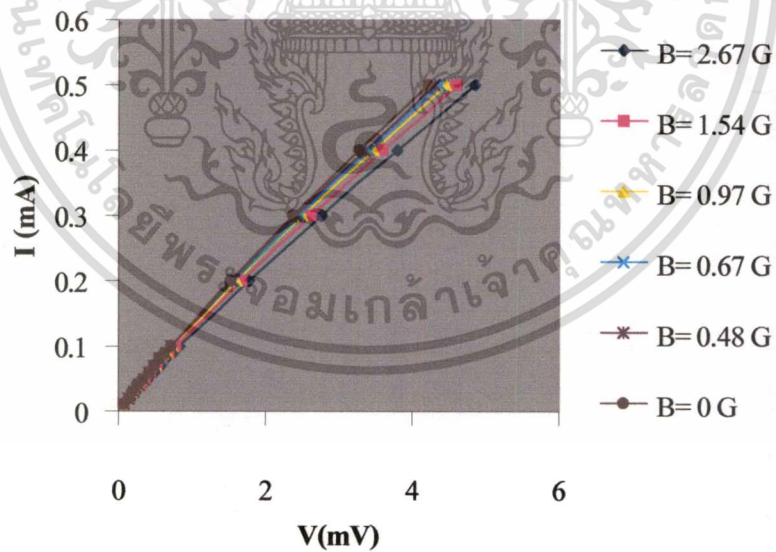
4.3.3 ผลการทดลองที่ความยาวค่าต่างๆ (L)

จากการทดลองผลของความยาวของระยะระหว่างขั้ววัดแรงดันตกคร่อมของชิ้นสารฟิล์มหนาได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.13, 4.14, 4.15 และ 4.16 เป็นผลการทดลองที่ความยาวของชิ้นสาร 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 เซนติเมตร พบว่าเมื่อความยาวของชิ้นสารยาวมากขึ้น ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง มีค่ามากขึ้นอย่างมาก

ถ้าพิจารณาที่กระแสไบอัสคงที่ 0.5 mA ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอก 2.67 เกาส์ ค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่มีความยาวระหว่างขั้ว 1.0 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 2.31 mV แต่ชิ้นสารที่มีความยาวระหว่างขั้ว 2.0, 3.0, และ 4.0 เซนติเมตร มีค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเท่ากับ 4.85, 5.71 และ 6.65 mV ตามลำดับ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ΔV กับ สนามแม่เหล็กภายนอก B โดยค่า ΔV คือค่าความแตกต่างของแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ กับที่ค่าสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.17 พบว่าค่า ΔV ที่ความยาวระหว่างขั้ววัดแรงดัน 1.0 เซนติเมตรมีค่าต่ำกว่า ค่า ΔV ของชิ้นสารที่มีความยาวระหว่างขั้ววัดแรงดัน 2.0, 3.0 และ 4.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นสารมีความยาวระหว่างขั้ววัดแรงดันตกคร่อมมากขึ้น ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันขณะมีสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะมีค่ามากขึ้นด้วย

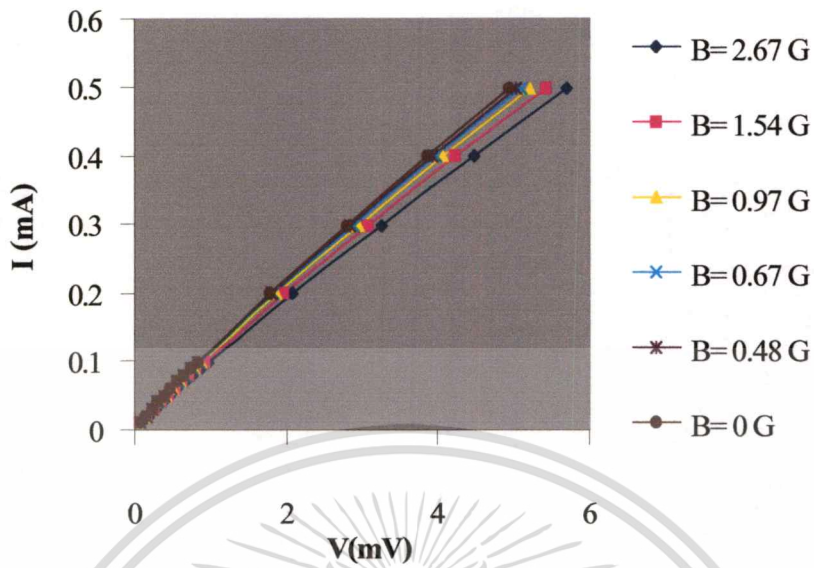


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 1.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

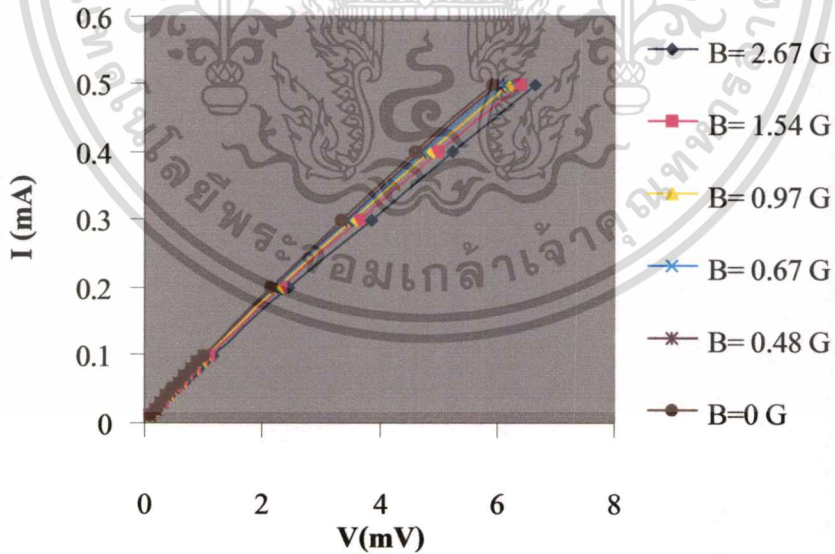


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 2.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

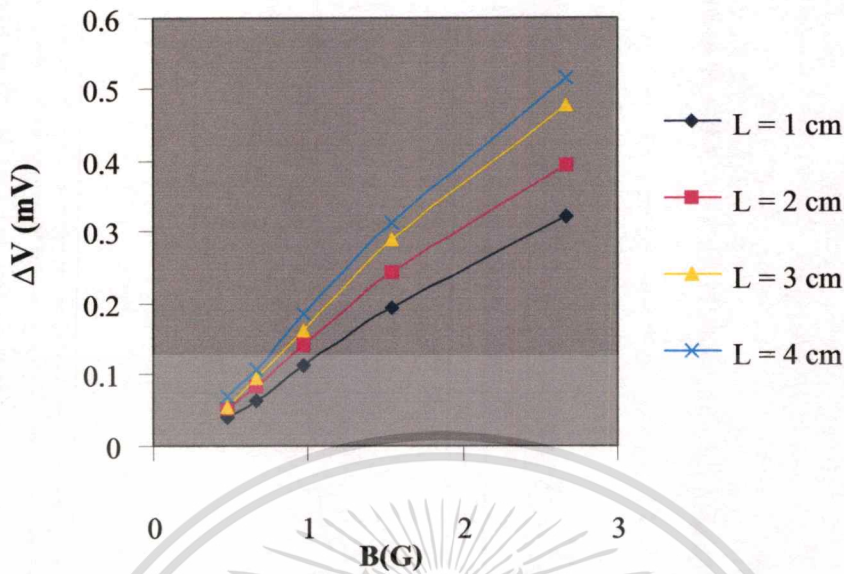


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 3.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่ความยาว 4.0 cm ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

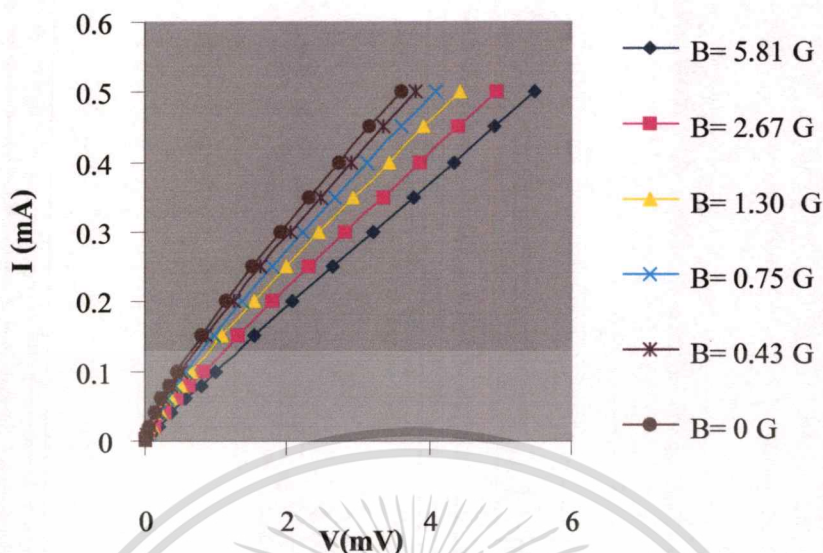


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่ความยาวระหว่างขั้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารค่าต่างๆ

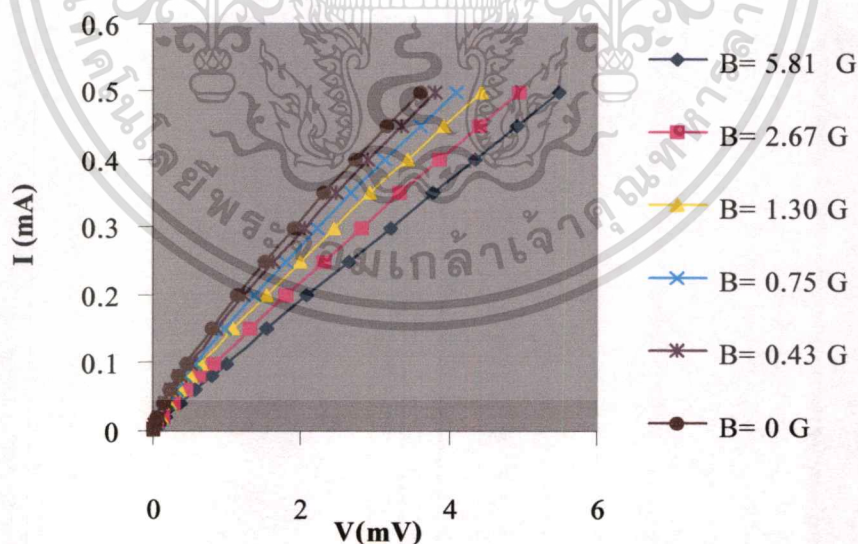
4.3.4 ผลการทดลองที่ลวดลายแบบต่างๆ

การทดลองนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะลวดลายของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งหมด 3 แบบ โดยกำหนดให้ค่าความหนาของแต่ละแบบนั้นมีค่ากัน และมีความยาวระหว่างขั้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเท่ากันด้วย ผลการทดลองที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 พบว่าค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในแต่ละแบบนั้นมีค่าประมาณที่เท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาไม่ได้ขึ้นกับลักษณะของลวดลายที่มีการขดไปมา แต่ขึ้นกับความกว้าง ความยาว และ ความหนา ของแผ่นฟิล์มดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น

ถ้าพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยการให้ไบอัสกระแสคงที่ 0.5 mA ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากกระทำเท่ากับ 5.81 เกาส์ จะได้ค่าแรงดันตกคร่อมในรูปแบบที่ 1 เท่ากับ 5.497 mV และในรูปแบบที่ 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 5.495 และ 5.499 mV ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงดันตกคร่อมนี้มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก หรือกล่าวได้ว่าลักษณะรูปแบบทั้ง 3 แบบ นี้ไม่มีผลความแตกต่างกับการตอบสนองสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับสนามแม่เหล็กภายนอก B จะเห็นชัดเจนว่า ΔV ของแต่ละรูปแบบเกือบไม่แตกต่างกันเลย

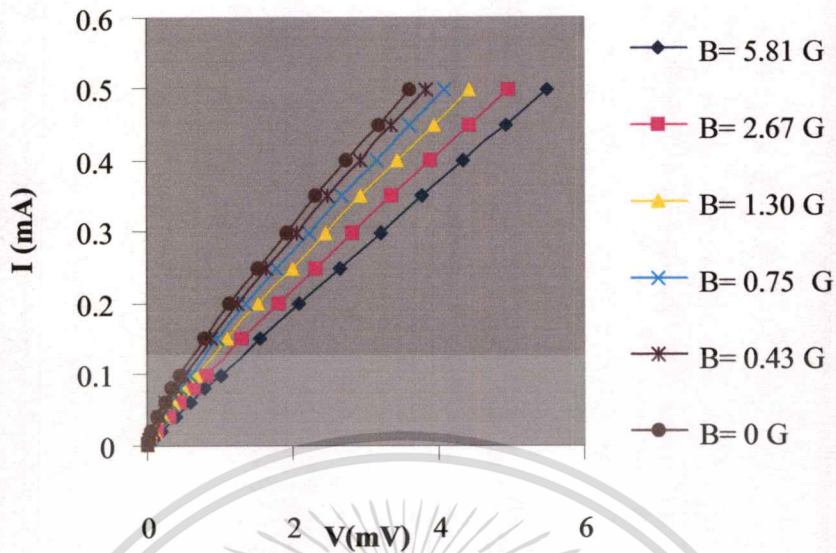


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 1 ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

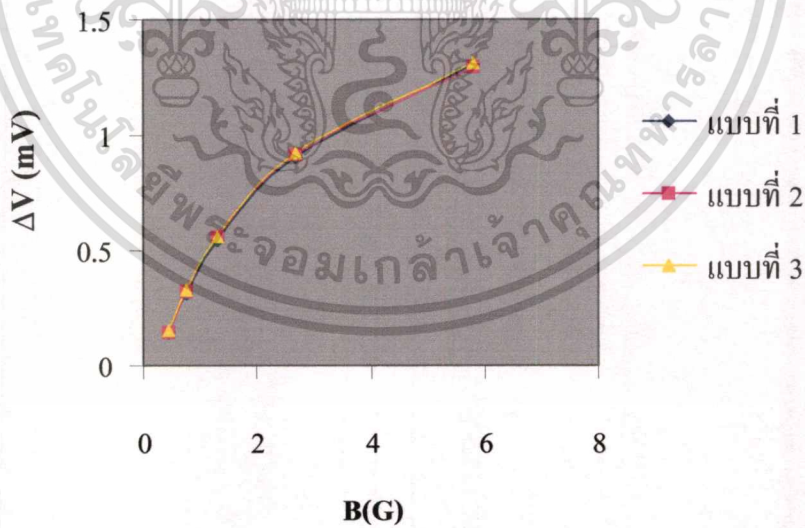


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 2 ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารในรูปแบบที่ 3 ขณะให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆ



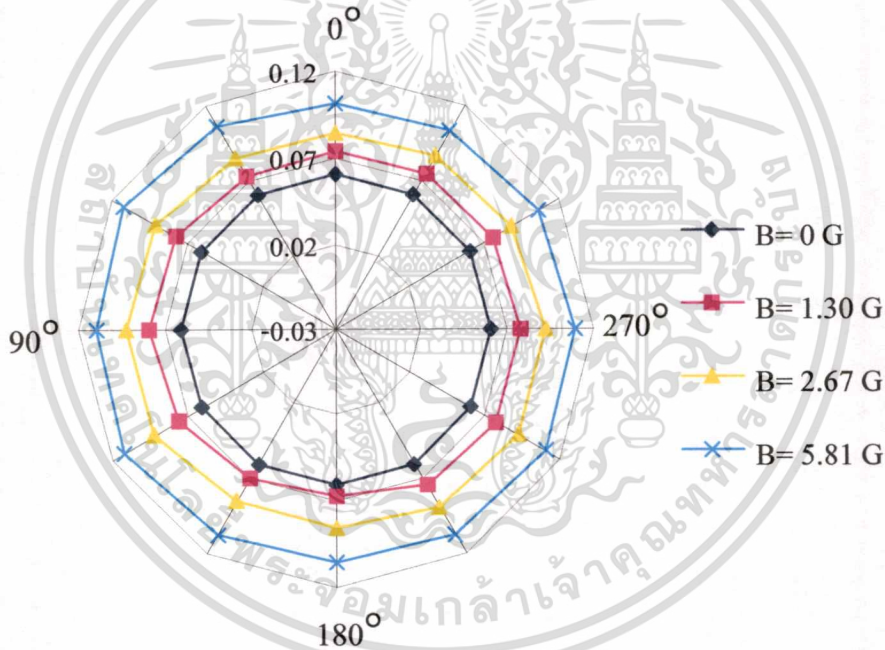
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่รูปแบบของหลอดฉายต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กภายนอกทิศทางต่างๆ

การทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กกับทิศทางต่างๆของสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น ได้มีการทดลองแล้วในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูป ซึ่งพบว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิกคือมีขนาดสนามแม่เหล็กเท่ากันทุกทิศทาง

จากการทดลองกับฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 โดยใช้ชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$ และในรูปที่ 4.23 ใช้ชิ้นสารขนาด $1.2 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$ พบว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังคงมีคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทรปิก ในขนาดของชิ้นสารที่กำหนดให้ในการทดลอง แต่จะสังเกตได้ว่าที่มุม 0 องศา และ 180 องศา ค่าของแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะต่ำกว่าที่มุมอื่นๆเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากแผ่นฟิล์มมีลักษณะแบนเป็นระนาบ ทำให้เกิดความแตกต่างของการทำลายส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปเล็กน้อย

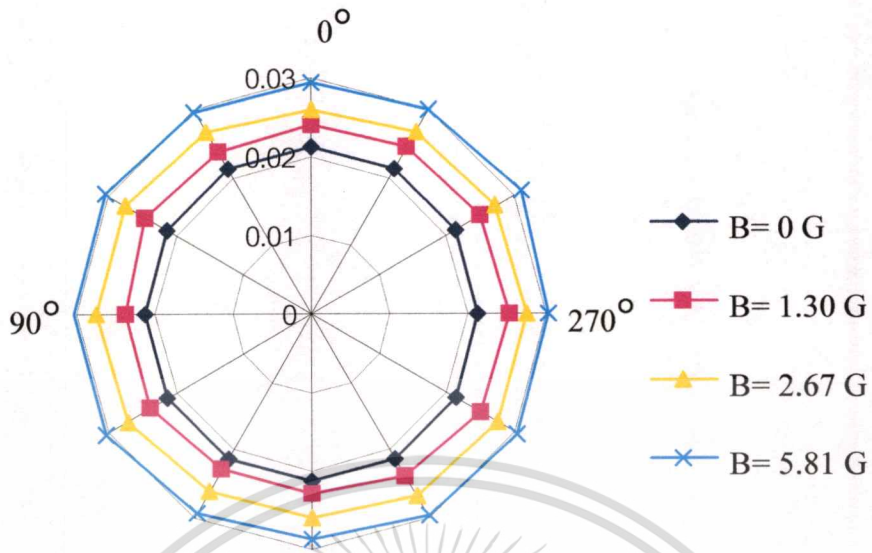


รูปที่ 4.22 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับชิ้นสารขนาด $0.5 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$

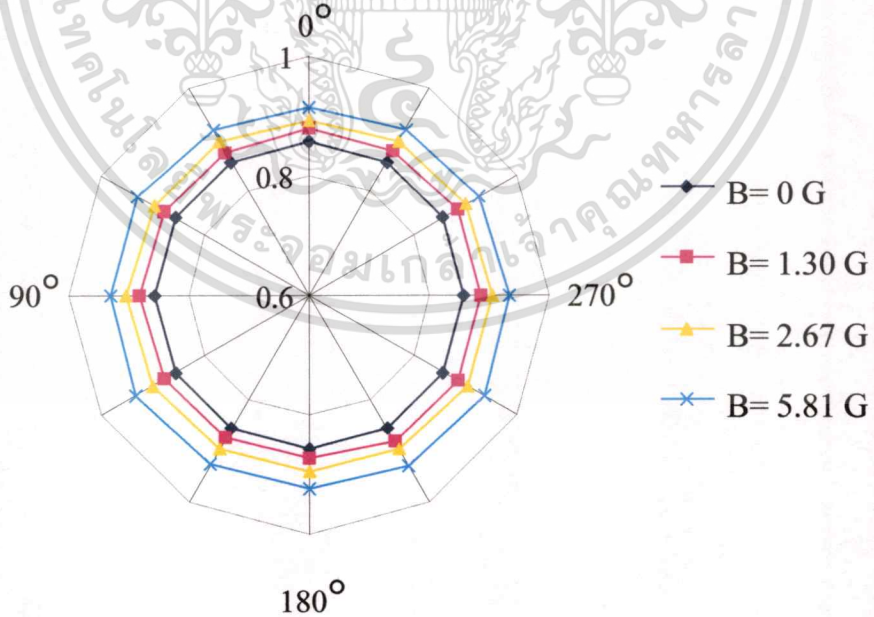
สำหรับชิ้นสารที่มีขนาดความกว้างมากขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมชิ้นสารในมุมต่างๆ แตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันในแต่ละส่วนของเนื้อฟิล์ม ส่วนชิ้นสารที่เป็นลวดลายในขนาดที่กำหนด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดันในแต่ละมุมนั้นก็ยังมีเท่ากันอยู่ ซึ่งลักษณะของฟิล์มที่เป็นลวดลายก็สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ทุกทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิศวกรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชั้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำกับชิ้นสารขนาด $1.2 \times 1.0 \times 0.032 \text{ cm}^3$



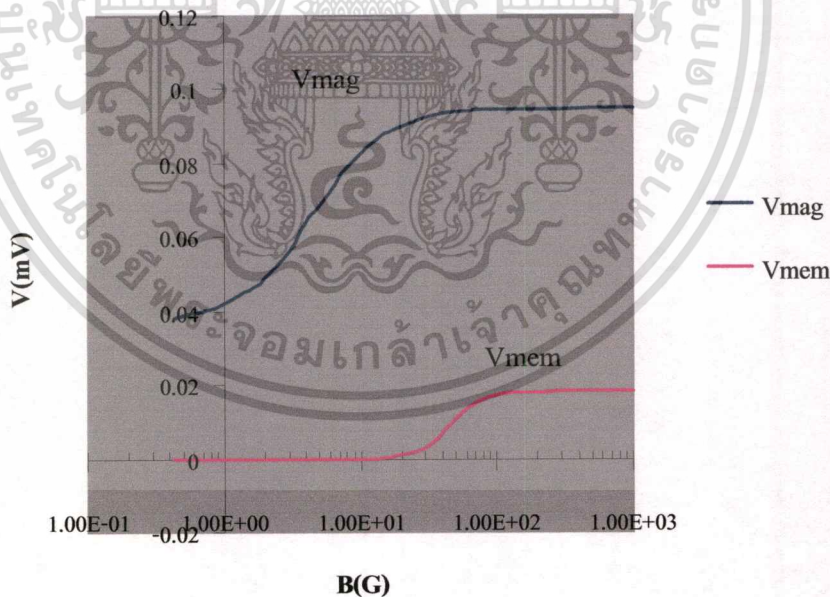
รูปที่ 4.24 กราฟเชิงขั้วแสดงค่าแรงดันตกคร่อมชั้นฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับมุมของสนามแม่เหล็กที่มากกระทำกับชิ้นสารแบบลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลทดลองการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ผลการทดลองการจำสภาพแม่เหล็กของฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.25 เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชั้นสารกับสนามแม่เหล็ก เปรียบเทียบในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ และขณะนำสนามแม่เหล็กนั้นออก พบว่าเส้นกราฟขณะให้สนามแม่เหล็ก มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมชั้นสาร (V_{mag}) เป็นเชิงเส้นตั้งแต่ค่าสนามแม่เหล็กประมาณ 0.45 เกาส์ จนถึงค่าสนามแม่เหล็กประมาณ 30 เกาส์ การเปลี่ยนแปลงแรงดันจึงเริ่มเปลี่ยนน้อยลง ส่วนเส้นกราฟขณะที่นำสนามแม่เหล็กออกนั้น ค่าแรงดันที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก (V_{mem}) มีค่าเป็นศูนย์จนกระทั่งที่สนามแม่เหล็กประมาณ 18 เกาส์ ค่าแรงดันการจำ จึงเริ่มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่ค่าสนามแม่เหล็กประมาณ 90 เกาส์ การเปลี่ยนแปลงแรงดันจึงเริ่มเปลี่ยนน้อยลง

ในการใช้ฟิล์มหน้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กนั้น ไม่ควรใช้งานในช่วงที่เกิดการจำสภาพแม่เหล็กขึ้น เพราะจะทำให้การวัดสนามแม่เหล็กในขณะย้อนกลับมีค่าไม่เท่าเดิม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการจำสภาพแม่เหล็กของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบชั้นรูป จะมีค่าใกล้เคียงกับชั้นสารแบบฟิล์มหนา ซึ่งอาจเป็นเพราะคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับสนามแม่เหล็กเพื่อแสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการจำสภาพแม่เหล็ก

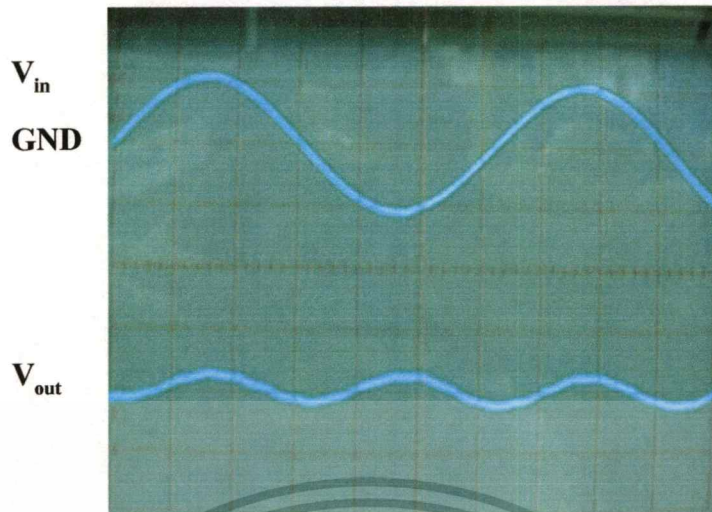
4.6 ผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ

4.61 ผลการทดลองที่สัญญาณแรงดันอินพุตค่าต่างๆ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.26-4.29 พบว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับได้เป็นอย่างดี โดยมีรูปสัญญาณเป็นแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectification) ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วน โดยเริ่มจากส่วนคอดในเนื้อสาร เมื่อเกิดการขาดกันของส่วนนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร

จากรูปที่ 4.26 ขณะที่ให้แรงดันอินพุต 2 โวลต์ จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เข้าไปในขดลวด สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า กรณีที่ให้แรงดันอินพุตขนาด 3, 5 และ 10 โวลต์ ซึ่งแรงดันอินพุตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจึงทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้มากขึ้น จะเห็นว่าสอดคล้องกับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบคงที่ ผลการทดลองต่อไปจะศึกษาการตอบสนองที่ความถี่ต่างๆ ว่าชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนาสามารถตอบสนองได้ถึงช่วงความถี่ใด





$V_{in} = 1 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 50 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 2 \text{ ms/div.}$

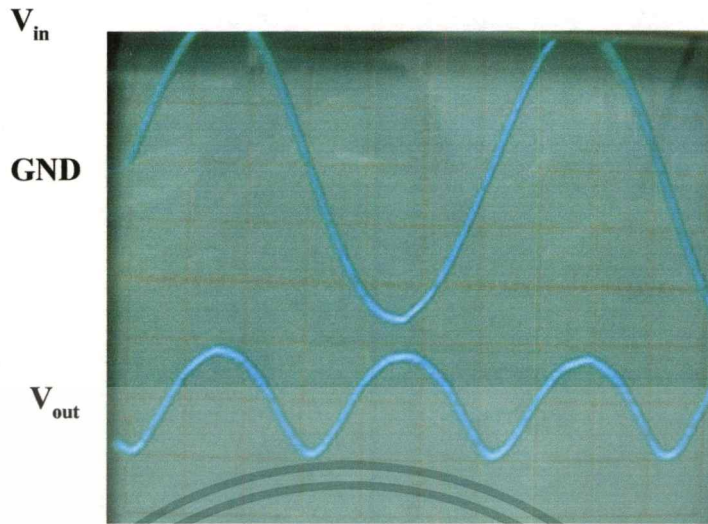
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 2 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA



$V_{in} = 1 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 50 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 2 \text{ ms/div.}$

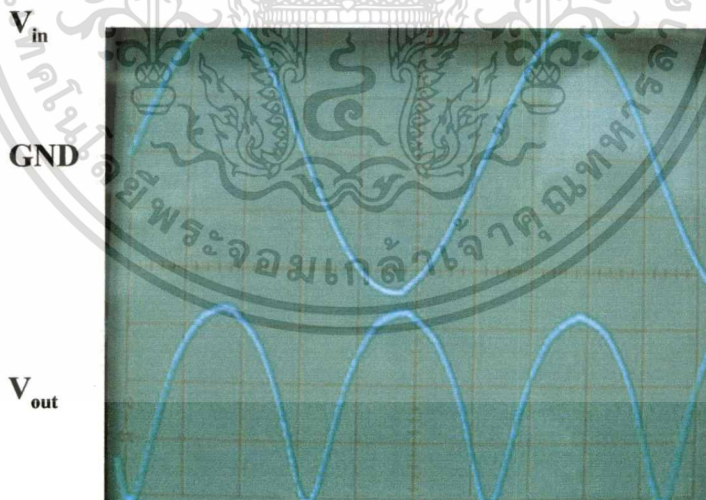
รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 3 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$V_{in} = 1 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 50 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 2 \text{ ms/div.}$

รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับขั้วของฟิล์มหนาทึบนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 5 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA



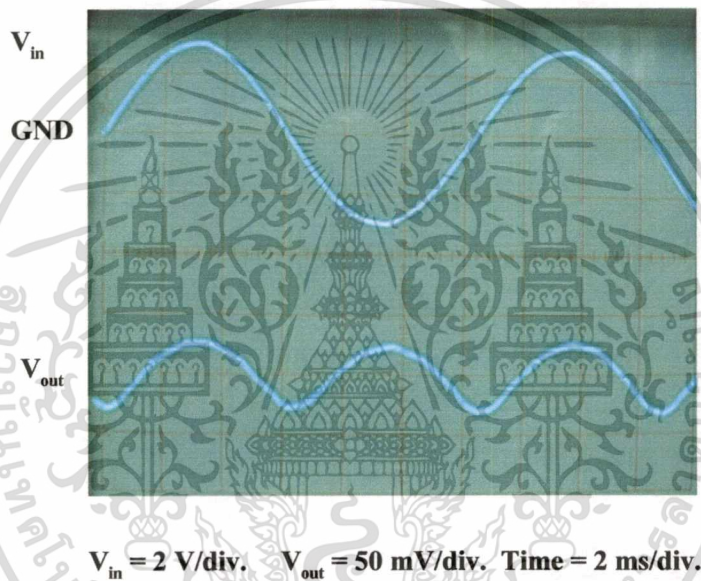
$V_{in} = 2 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 50 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 2 \text{ ms/div.}$

รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับขั้วของฟิล์มหนาทึบนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 10 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA

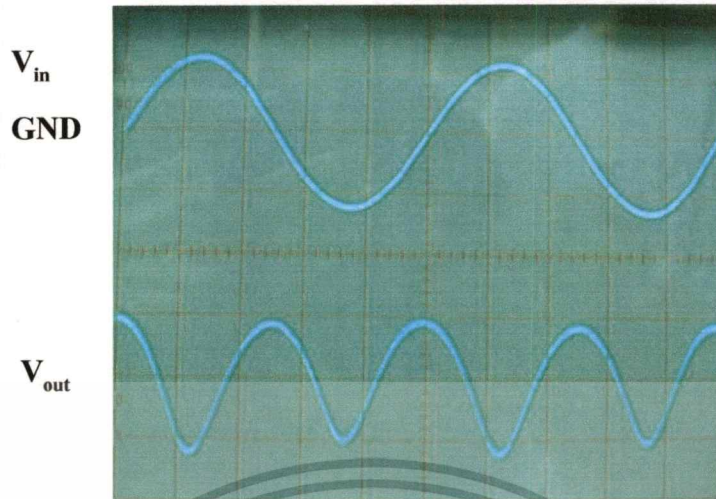
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.62 ผลการทดลองที่สัญญาณอินพุตความถี่ต่างๆ

จากการทดลองได้เปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ให้กับขดลวด พบว่าฟิล์มเหนียวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับได้ที่ความถี่ต่ำ ในรูปที่ 4.30 เป็นสัญญาณเอาท์พุทที่ความถี่ 80 Hz ลักษณะของสัญญาณเต็มคลื่นแบบสมมาตร แต่เมื่อเพิ่มความถี่ของสัญญาณอินพุตขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงที่ความถี่ประมาณ 1 kHz ลักษณะของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไป รูปคลื่นไม่สมมาตร และเมื่อเพิ่มเป็น 2 – 3 kHz สัญญาณเอาท์พุทก็จะเปลี่ยนไปมากขึ้น ดังรูปที่ 4.31 – 4.33 ดังนั้นความถี่ของสนามแม่เหล็กแบบสลับที่ฟิล์มเหนียวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองได้จึงอยู่ในช่วงประมาณ 0-800 Hz



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มเหนียวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 6 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA



$V_{in} = 2 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 20 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 0.2 \text{ ms/div.}$

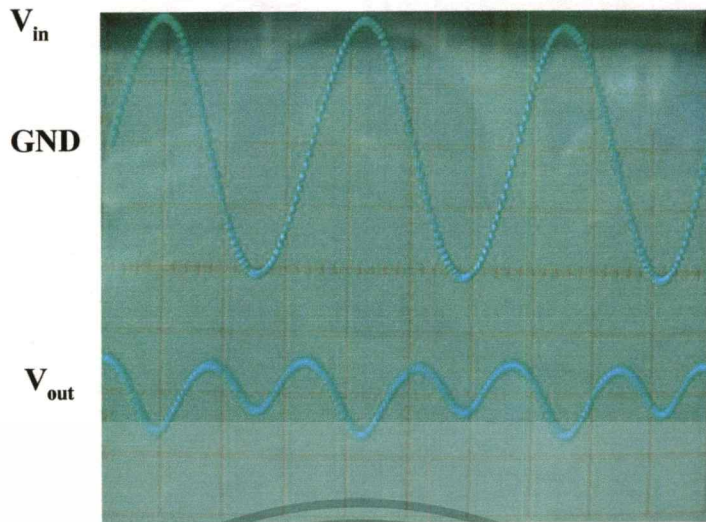
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 1 kHz ขนาดแรงดัน 6 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA



$V_{in} = 2 \text{ V/div.}$ $V_{out} = 50 \text{ mV/div.}$ $\text{Time} = 0.1 \text{ ms/div.}$

รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 2 kHz ขนาดแรงดัน 7 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$V_{in} = 2 \text{ V/div.} \quad V_{out} = 0.1 \text{ V/div.} \quad \text{Time} = 0.1 \text{ ms/div.}$$

รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 3 kHz ขนาดแรงดัน 8 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 10 mA

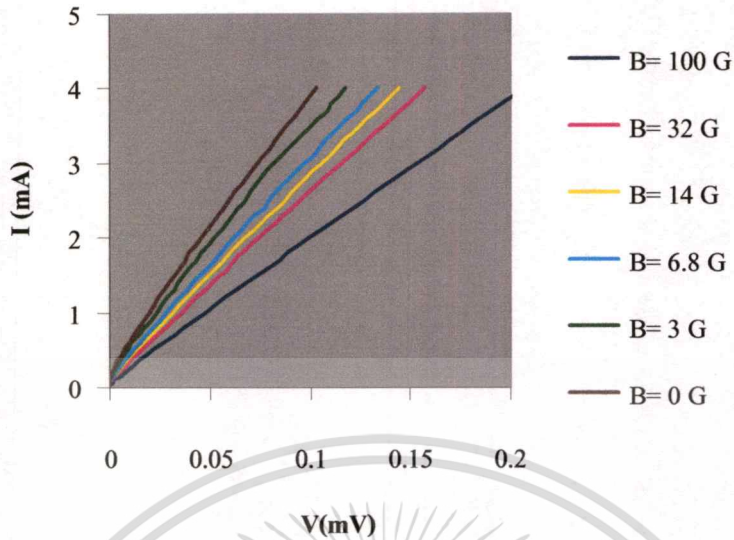
4.7 ผลการทดลองผลของการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) ที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ผลการทดลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กของการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์พบว่าการเจือสารซิลเวอร์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะนำไปให้เนื้อสารมีความต้านลดยลดลง จากรูปที่ 4.34 – 4.36 จะเห็นว่าค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารจะมีค่าน้อยลง เมื่ออัตราการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.1 ไปเป็น 0.2 และ 0.4 โดยอะตอม ที่สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง

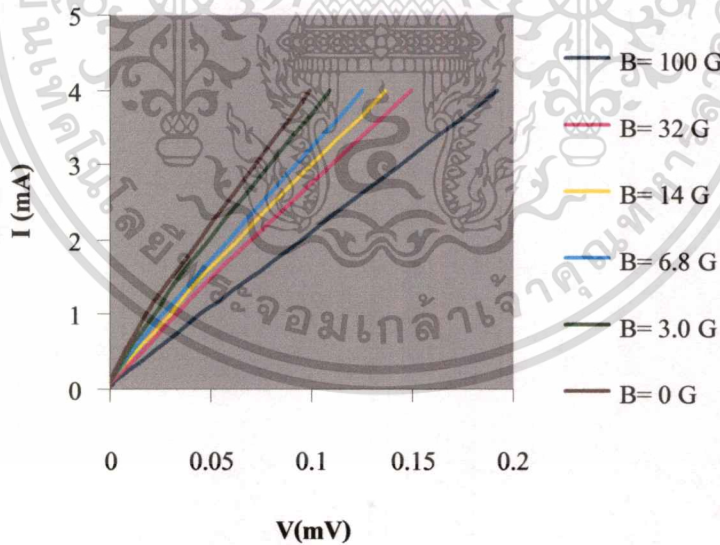
ในการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์นี้ ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ไม่ได้เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ ค่ากระแสวิกฤตของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์มีค่าสูงกว่า และมีความต้านทานน้อยกว่าอีกด้วย ดังนั้นปริมาณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาจึงมีน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.37

สำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กของชิ้นสารฟิล์มหนาที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์นี้ สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กสูงๆ ได้ดีกว่า แต่การตอบสนองสนามแม่เหล็กค่าต่ำ ๆ นั้นต้องให้ค่ากระแสไบอัสที่สูงกว่าชิ้นสารที่ไม่เจือซิลเวอร์ออกไซด์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

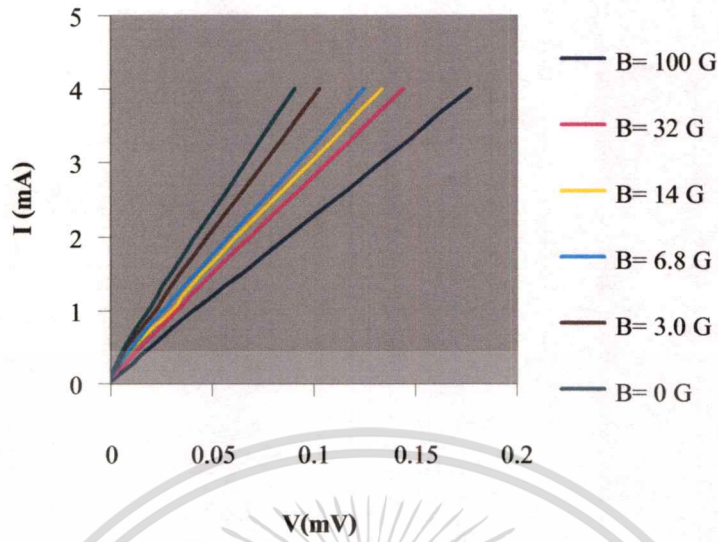


รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของซึ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.1 โดยอะตอม

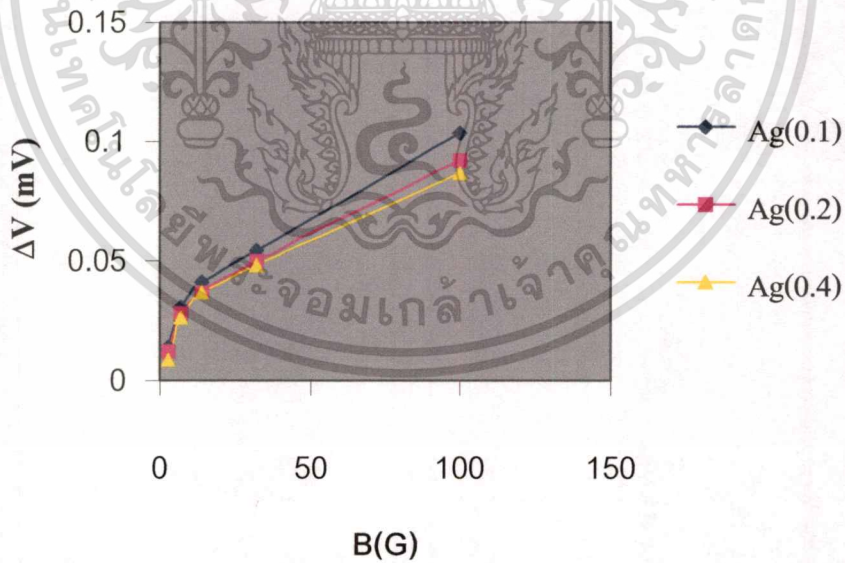


รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของซึ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.2 โดยอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ของชิ้นสารที่เจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.4 โดยอะตอม

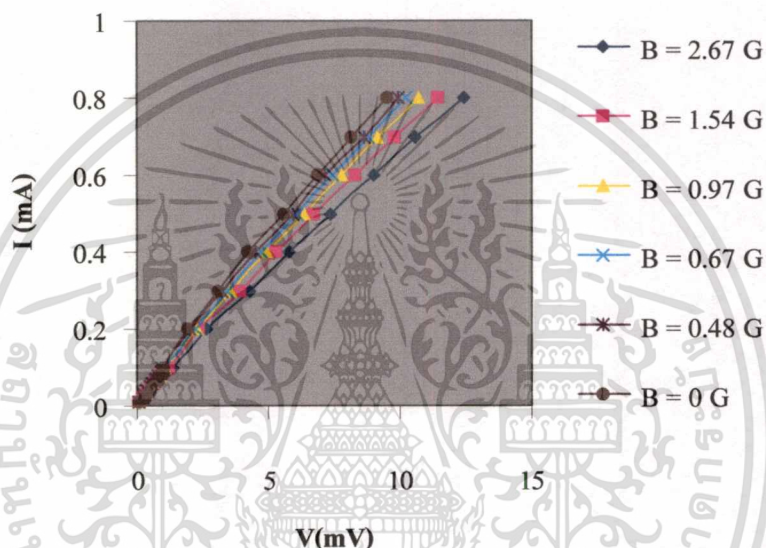


รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ที่การเจือซิลเวอร์ออกไซด์อัตราส่วน 0.1, 0.2 และ 0.4 โดยอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

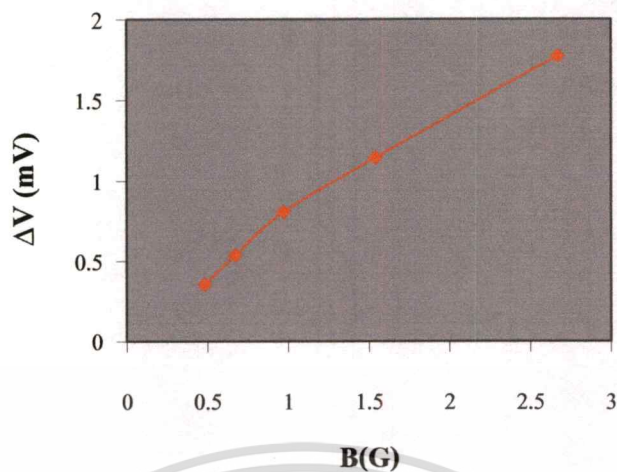
4.8 ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ออกแบบ

การออกแบบหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ได้อาศัยผลการทดลองในข้างต้นเพื่อกำหนดให้หัววัดมีคุณสมบัติไปในแนวทางที่ต้องการ แต่ไม่ได้หมายความว่าต้องมีสัดส่วนตามที่กำหนดไว้ทั้งหมด โดยผลการทดสอบได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออกแบบ ที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

พบว่าค่าแรงดันของเซ็นเซอร์จะมีค่าสูงเนื่องจากเซ็นเซอร์ได้ออกแบบให้มีความหนาแน่นน้อยที่สุด และมีลักษณะยาวขดไปมา เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 4.39 จะเห็นว่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซ็นเซอร์จะมีสูงเมื่อมีสนามแม่เหล็กคงที่ค่าหนึ่ง ถ้าพิจารณาที่สนามแม่เหล็กประมาณ 1 เกาส์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันประมาณ 0.85 mV



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ΔV กับค่าสนามแม่เหล็กภายนอก B ของหัววัดสนามแม่เหล็กที่ออกแบบ



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ โดยใช้วิธีการสกรีนเนื้อสารลงบนฐานรองอลูมินา เพื่อนำสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนานี้ไปใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้คือ การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในขั้นตอนการสร้างเป็นแผ่นฟิล์ม การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดและลวดลายของชิ้นสารที่มีต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็ก การศึกษาการตอบสนองสนามแม่เหล็กในทิศทางต่างๆ การจำสภาพแม่เหล็ก และการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ ซึ่งการวิจัยในหัวข้อต่างๆ เหล่านี้เพื่อหาลักษณะและขอบเขตของการตอบสนองสนามแม่เหล็กของหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับการเจือสารซิลเวอร์ออกไซด์เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า อุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกับฐานรองดีคเนนติ และมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมผงสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเช่นกัน

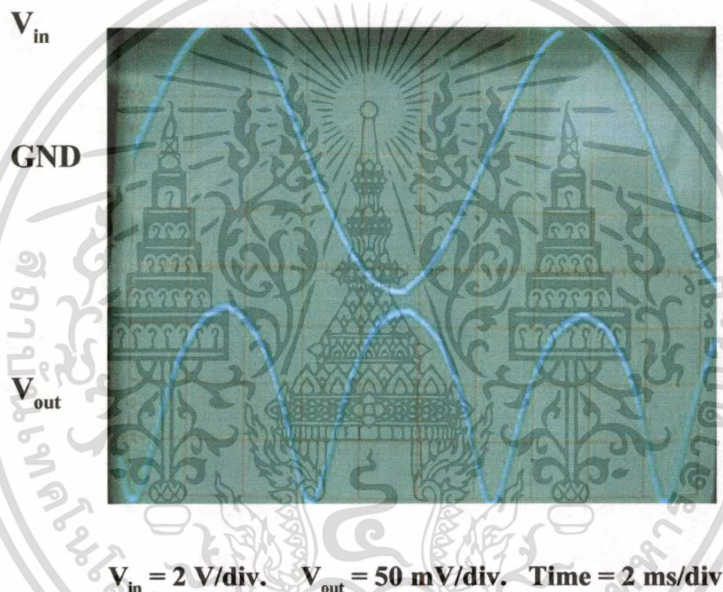
สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดและลวดลายชิ้นสารนั้น สรุปได้ว่า เมื่อชิ้นสารมีความหนา (T) มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันของชิ้นสารเนื่องจากให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง จะลดน้อยลง และกรณีที่ความกว้าง (W) ของชิ้นสารมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันของชิ้นสารเนื่องจากให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะลดน้อยลงเช่นกัน ส่วนกรณีที่ความยาว (L) ระหว่างขั้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเนื่องจากให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะมากขึ้นด้วย ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงลวดลายของชิ้นสารทั้ง 3 แบบนั้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของชิ้นสาร โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับสมการความต้านทาน $R = \rho L/A$ ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกเมื่อเริ่มเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะมีเริ่มมีความต้านทานเกิดขึ้น

ในการศึกษาผลของทิศทางของสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบไอโซโทโรปิก คือสามารถตอบสนองได้ในทุกทิศทาง แต่เมื่อพิจารณาผลของความกว้างของแผ่นฟิล์มพบว่าที่มุม 0 องศา และ 180 องศา นั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะลดน้อยลงจากทิศทางอื่นๆ เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษการจำสภาพแม่เหล็กของชิ้นสารแบบฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สรุปได้ว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนาจะเริ่มตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ประมาณ 0.45 เกาส์ โดยให้ กระแสไบอัสที่ 0.1 mA และชิ้นสารจะเริ่มเกิดการจำสภาพแม่เหล็กที่ 18 เกาส์ ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบฟิล์มหนาไม่สามารถให้การวัดค่าสนามย้อนกลับไม่เท่าเดิม ส่วนฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์จะมีค่ากระแสวิกฤตสูงกว่าสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ไม่เจือสารซิลเวอร์ออกไซด์ และปริมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง จะลดลงเมื่ออัตราส่วน โดยอะตอมของซิลเวอร์ออกไซด์เพิ่มจาก 0.1 เป็น 0.2 และ 0.4

สำหรับการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับ ซึ่งฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถตอบสนองต่อสัญญาณที่มีการเปลี่ยนขึ้นกับเวลา โดยมีรูปสัญญาณแบบเต็มคลื่นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตที่สัมพันธ์กับเวลาของการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสลับของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ความถี่ 80 Hz ขนาดแรงดัน 10 V กระแสไบอัสแก่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 20 mA

โดยขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้สนามแม่เหล็กแบบสลับสูงขึ้น และสามารถตอบสนองความถี่ได้ระหว่าง 0-800 เฮิรท์ซ์ ถ้าพิจารณาความสามารถในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบคงที่ พบว่าสามารถตอบสนองสนามได้ต่ำถึง 0.45 เกาส์ ซึ่งในกรณีที่ออกแบบให้ฟิล์มหนามีลักษณะเป็นแผ่นบาง มีลวดลายขดไปมาจะทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมชิ้นสารมีค่าสูง ในขณะที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งๆ

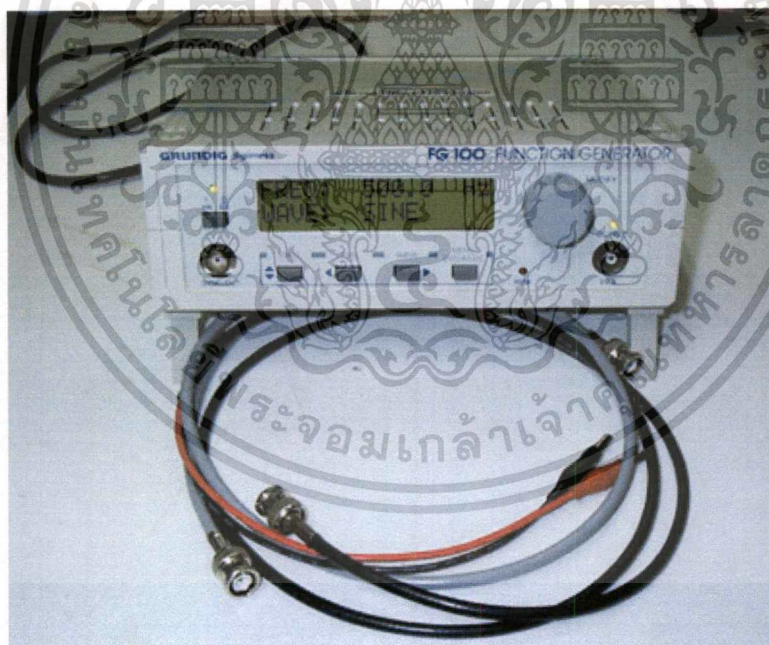
เอกสารอ้างอิง

- [1] Jha A.R. 1998. **Superconductor Tecnology**. New York: John Wiley & Sons.
- [2] Bourdillon A. 1994. **High Temperature Superconductors**. Boston. :Academic Press.
- [3] Divid E. Clark and Bruce K. Zoitos. 1992. **Corrosion of Glass, Ceramics and Ceramic Superconductors**. New Jersey
- [4] คูสิต เครื่องงาม. 2535. **โพลีคริสตัลฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [5] Kozo Osamura. 1994. **Composite Superconductors**. New York : Marcel Dekker.
- [6] สมศักดิ์ ชงยิ่งศักดิ์ถาวร. “การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แม่กนิโตรซอสติฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด.”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [7] ชบา ชมภูพงษ์. “การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซรามิก.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2538.
- [8] ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ , ธนะภากาญจน์ ภัทรากาญจน์ . **ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 2** . กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [9] เฉชา ศศศักดิ์ศรี และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง. “การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแบบคงที่ของฟิล์มหนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด YBCO ที่เจือ Ag_2O .” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24. 2544. หน้า 927-932

ภาคผนวก

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

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



รูปเครื่องกำหนดสัญญาณเอาต์พุต (Function Generator) FG100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	เดชา ยศศักดิ์ศรี
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดสุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้