

การศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

แบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

Study on Properties and Application of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Superconductor to Magnetic Sensor



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 46242
วัน, เดือน, ปี... 21 ต.ค. 2546

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

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

Study on Properties and Application of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Superconductor to Magnetic Sensor



ปริญญาโท สำหรับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544


ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นหัววัด
สนามแม่เหล็ก

ผู้จัดทำ

พัฒน์พงศ์	ปลื้มเกษร	42015187
ไพโรจน์	นวลสนอง	42015189
ยุทธนา	กาญจนวโนทยาน	42015191


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
แบบ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

พัฒนพงศ์	ปลื้มเกษร
ไพโรจน์	นवलสนอง
ยุทธนา	กาญจนา โนนทยาน
รศ. ดร. วิสุทธิ	จิตร์รุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2544	

บทคัดย่อ

รายงานการศึกษานี้ได้ทำการเสนอการหาเงื่อนไขแรงอัดที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ที่สร้างจากห้องปฏิบัติการสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูง ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

ในการศึกษาได้ทำการขึ้นรูป (อัดเม็ด) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยใช้แรงอัดต่างๆกัน 6 แบบ คือ ใช้แรงอัด 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 ตัน จากผลการศึกษาคุณสมบัติพบว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่แรงอัดต่างๆ กันมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่างกัน ซึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบที่มีแรงอัด 0.4 ตันจะมีค่ากระแสวิกฤตต่ำสุด และแบบที่มีแรงอัด 1 ตันจะสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดี แล้วนำไปลดกระแสวิกฤต โดยการตะไบเป็นรูปตัวยู ซึ่งจะทำให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดีขึ้นด้วย แล้วนำไปใช้งานร่วมกับวงจร โดยนำแรงดันที่ตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาส่งให้ภาคขยายและภาคแปลงสัญญาณนอกเป็นดิจิทัล และแสดงผลเป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่อไป

Study on Properties and Application of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Superconductor to Magnetic Sensor

Phatthanapong Pluemkasorn

Phairoj Naunsanong

Yutthana Karnjanawanotayan

Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang Advisor

Educational Year 2001

ABSTRACT

This report presents the study of the suitable pressure condition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductor. The standard fabrication of Superconductor Laboratory, Electronic Research Center, Faculty of Engineering, King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) used for this study.

In studying were tablet - pressed into 6 form, which were pressure 0.4 ton, 0.6 ton, 0.8 ton, 1.0 ton, 1.2 ton and 1.4 ton. It is found that the lowest critical current at pressure of 0.4 ton and best sensitivity to magnetic field at 1.0 ton. The critical current of superconductor at 1.0 ton is reduced by filing into u – model. It is made the sensitivity magnetic better. Then, it is used together with an application circuit. The voltage of superconductor is applied to amplifier, then to A/D converter. Finally, the signal is monitored on 7 – segment display as the value of magnetic field density.

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของโครงการในครั้งนี้เกิดขึ้นได้ ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์ ของ รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง ในการให้แนวคิด การแก้ไขปัญหาและให้การสนับสนุนมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณนพดล สิริพิล และ คุณวิสิฐ วงศ์สุทธิธรรม ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำโครงการชิ้นนี้ และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การค้นพบสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด	1
1.2 การจัดกลุ่ม Superconductor	2
1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง	3
1.3.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์	3
1.3.2 งานด้านระบบกำลัง	4
1.3.3 งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์	5
1.3.4 การคมนาคม	6
1.3.5 การทหาร	6
บทที่ 2 คุณสมบัติและหลักการของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด	8
2.1.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน	8
2.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	9
2.1.4 อุณหภูมิวิกฤต	10
2.1.5 ปรากฏการณ์จิลสบี	11
2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	12
2.2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์	12
2.2.2 กระแสคงสภาพ	13
2.2.3 ปรากฏการณ์กระแสคงสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	15
2.2.4 สนามแม่เหล็กวิกฤต	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.5 การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก	17
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค	18
บทที่ 3 การทดลองและการประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก	20
3.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	20
3.1.1 การเตรียมสารเคมี	20
3.1.2 อุปกรณ์สำหรับผสมและใส่สารที่จะเผา	20
3.1.3 เตาเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง 1,050 องศาเซลเซียส	21
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	21
3.1.5 การอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
3.2 การทดสอบการมีสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	24
3.2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (MEISSNER EFFECT)	24
3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	24
3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	26
3.3.1 ลักษณะการขึ้นรูปของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	26
3.3.2 การสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	27
3.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง	27
3.5 ขั้นตอนในการทดลองที่ 1	28
3.6 การประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	29
3.6.1 ขั้นตอนการลดค่ากระแสวิกฤติ	29
3.6.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2	30
3.7 วงจรที่ใช้วัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	31
3.7.1 ขั้นตอนในการทดลองที่ 3	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว	37
4.1.1 เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงแรงอัดของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว ที่ค่าต่าง ๆ	37
4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงแรงอัดของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว ที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระทำ	43
4.2 ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสรั่วกับค่าแรงอัดของฉนวนต่าง ๆ กัน	49
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง	50
4.4 แนวทางการประยุกต์ฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาวเป็นห้วัดสนามแม่เหล็ก	51
4.5 การทดลองประยุกต์ใช้งานฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาวเป็นห้วัดสนามแม่เหล็ก	51
4.5.1 ผลการทดลองลดกระแสรั่วของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว ด้วยการตะไบ	51
4.5.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว เมื่อนำไปตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	52
4.5.3 ผลการทดลองหาผลกระทบความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ของฉนวนตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยาว หลังจากทำการลดค่ากระแสรั่ว ด้วยการตะไบ โดยใช้วงจรที่สร้างขึ้น	54
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์	56
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes (1911)	2
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ	9
2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	10
2.3 V-I ขณะเกิดปรากฏการณ์ Silsbee effect	11
2.4 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	12
2.5 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่างๆ	13
2.6 (a) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกตัดผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (b) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้านและกระแสสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	14
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ	16
2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ	17
2.9 แบบจำลองของสารเซรามิกนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง (a) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค (b) แบบจำลองอย่างง่าย	18 19
3.1 อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง	20
3.2 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส	21
3.3 แผนผังขั้นตอนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $Yb_2Cu_3O_{7-x}$	22
3.4 แผนผังขั้นตอนการเผาเม็ดชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
3.5 เครื่องอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	23
3.6 ผลของการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่ได้จากการทดลอง	24
3.7 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน	25
3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก	26
3.9 แสดงชิ้นสารที่ทำการอัดเม็ด	26
3.10 แสดงชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ทำการตะไบตามขนาด	26
3.11 แสดงจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	27
3.12 แสดงรูปที่ใช้ในการทดลองหาค่ากระแสวิกฤต	27
3.13 แสดงรูปที่ใช้ในการทดลองผลกระทบความเข้มสนามแม่เหล็ก	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด	29
3.15 แสดงขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหลังการตะไบเป็นรูปตัวยู	29
3.16 แสดงจุดสัมผัสบนขึ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปตัวยู	29
3.17 บล็อกไดอะแกรมของวงจรวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	31
3.18 วงจร Inverting Amplifier	31
3.19 วงจรส่วนแสดงผล	32
3.20 วงจรสร้างไฟลอป	34
3.21 แสดงวงจรรวมเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	35
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.4 ton	37
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ton	38
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ton	39
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ton	40
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ton	41
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ton	42
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.4 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	43
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	44
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	45
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	46
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	47
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ton เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	48

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับค่าแรงอัดของชิ้นสารต่างๆ กัน เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	49
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมชิ้นสารกับสนามแม่เหล็ก ภายนอกมากระทำ	50
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารหลังการตะไบของ ชิ้นสารที่มีแรงอัด 1 ตัน	51
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่มีแรงอัด 1 ตัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ	52
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มสนามแม่เหล็กจาก การคำนวณ โดยใช้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่มีแรงอัด 1 ตัน เป็นตัวตรวจวัด	53
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ชิ้นสาร ตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ที่มีแรงอัด 1 ตัน วัดได้โดยใช้วงจรมัดที่สร้าง	54
4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากการคำนวณกับ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดจากวงจรมัดที่สร้างขึ้น	55

บทที่ 1

บทนำ

โดยทั่วไปตัวนำไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่าน จะมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน เนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าที่มีอยู่ในตัวนำตัวนั้น ส่วนในเรื่องของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด(Superconductor) คือตัวนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทานไฟฟ้าสามารถนำไฟฟ้าในปริมาณสูงๆ ได้ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนดังที่เกิดกับตัวนำธรรมดา

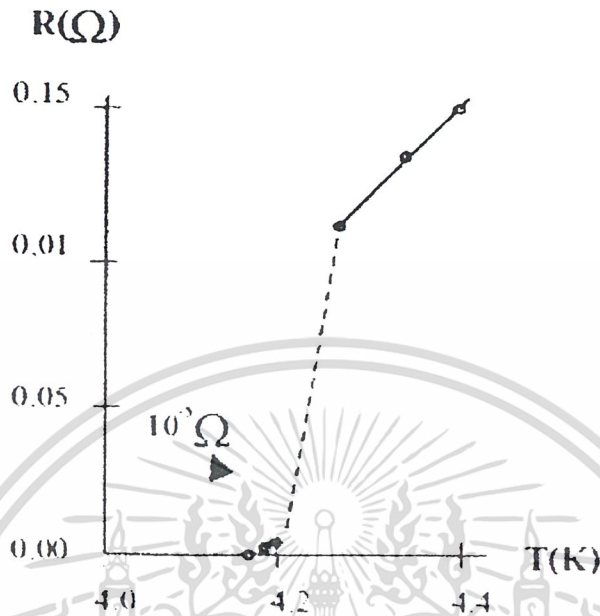
ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้มีผู้สนใจในการที่จะนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรมของโลกมีความสนใจเพิ่มสูงขึ้น และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านเทคโนโลยีอย่างมาก

1.1 การค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ช่วงระยะเริ่มต้นของ solid-state physics นักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจอย่างมากในเรื่องความสัมพันธ์ของปริมาณความต้านทานกับอุณหภูมิ Heike Kamerlingh-Onnes นักฟิสิกส์ชาวดัตช์ได้ทำการศึกษาเรื่องนี้ที่อุณหภูมิจากฮีเลียม โดยเลือกใช้ปรอทเป็นชิ้นสารในการทดลอง เพราะปรอทนั้นมีความบริสุทธิ์อย่างเพียงพอ

ใน ค.ศ. 1911 Heike Kamerlingh-Onnes ค้นพบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษามาสู่ยุคปัจจุบัน เขาได้วิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ เขาพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอทลดลงเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดที่อุณหภูมิจากประมาณ 4.2 K หรือเรียกว่า เกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: T_c) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) กับอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ของปรอท จากการทดลองของ Heike Kamerlingh-Onnes แสดงดังรูปที่ 1.1 นอกจากนี้ Onnes ยังได้พบสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดในโลหะอื่นๆ ทำให้ Onnes ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี พ.ศ. 2454

เมื่อนำเอาวงแหวนโลหะที่อยู่ในสถานะ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้า ความต้านทานจะหายไปเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนนี้เพิ่มขึ้น และยังคงไหลวนอยู่รอบๆ วงแหวนตลอดไป ดังตัวอย่างการทดลองของ Collins (ค.ศ. 1959) ได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าเวลาจะผ่านไปสองปีครึ่งแล้วก็ตาม ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนอยู่รอบวงแหวนโลหะนั้น



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิปรอท
จากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes (1911)

จากการค้นพบของ Heike Kamerlingh Onnes ได้มีการศึกษาทดลองตามมาอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใหม่ๆ อีกมากมาย และยังมีการศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเหล่านี้ สภาพไร้ความต้านทานนี้เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดข้อหนึ่ง แต่ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกเช่น การสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก และอุณหภูมิ

1.2 การจัดกลุ่ม Superconductor

Superconductor แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. Type I : ได้แก่ ธาตุบริสุทธิ์ พวก In, Sn, Tl ให้สนามวิกฤตต่ำ มีช่วงความยาวพร้อมเพรียงยาวกว่าความลึกซึมทราบ ($\xi > \lambda$) ซึ่งไม่เหมาะนำมาประยุกต์ใช้งาน
2. Type II: ได้แก่ โลหะพวก Alloys, Ceramics ที่ได้จากการผสมสารต่างๆเข้าด้วยกัน (ธาตุผสม) มีช่วงความยาวพร้อมเพรียงสั้นกว่าความลึกซึมทราบ ($\xi < \lambda$) จะให้สนามวิกฤตจาก HeI ที่กว้างกว่า สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาวิจัยพบว่าสารกลุ่ม Ceramic (ซึ่งมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอุณหภูมิห้องได้ไม่ดี) สามารถนำมาสร้างเป็น Superconductor ได้ดีกว่าพวกโลหะ (ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในอุณหภูมิห้องได้ดี)

1.3 ความสำคัญของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยุคนั้นมีความสามารถเหนือกว่าตัวนำธรรมดา 3 ข้อได้แก่

1. ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่มีความต้านทานไฟฟ้า หรือความต้านทานเป็นศูนย์
2. ไม่มีผลของความร้อนเนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย
3. ไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านทะลุ โดยจะประพุดิตัวเหมือน Diamagnet

ข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง ได้รับความสนใจอย่างยิ่งในการที่จะประยุกต์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงมาใช้งานด้านไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางความก้าวหน้าของอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3.1 งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนของทางด้านอิเล็กทรอนิกส์น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาก เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะพวกวงจรรวม ซึ่งมักจะเป็นวงจรสำเร็จในตัวเดียว ซึ่งได้เปรียบในการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ใหญ่ๆ ในกระบวนการสร้างวงจรรวมนั้นซับซ้อนทั้งเรื่องผลผลิต และการได้ชิพที่ทำกรบรรจุลงตัวถึง การต่อขาโดยใช้ลวดโลหะเชื่อมต่อกับวงจรรวมภายนอก ความร้อนนับเป็นสิ่งสำคัญต่อวงจรรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรรวมที่มีรายละเอียดมากๆ ความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรรวมขณะทำงาน ดังนั้นในการออกแบบวงจรรวมจึงต้องมีการเว้นระยะห่างของตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีที่พอที่จะกระจายความร้อน ทำให้ต้องสูญเสียพื้นที่ในส่วนนี้ไป แต่ในกรณีที่น่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ในวงจรรวมจะไม่เกิดปัญหาของความร้อน ตัวอุปกรณ์ในวงจรรวมจึงสามารถออกแบบให้อยู่ใกล้กันได้มาก ซึ่งในกรณีนี้ยังช่วยลดเวลาของการส่งผ่านสัญญาณ และชิพจะมีขนาดเล็กลงอีกด้วย

การใช้งานอีกแบบหนึ่งของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในงานอิเล็กทรอนิกส์ คือ รอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในลักษณะของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่สามารถทำงานเร็วกว่าทรานซิสเตอร์ได้เป็นร้อยเท่า ถ้านำมาใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ก็จะทำให้ความสามารถของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมาก ขณะที่ขนาดเล็กลงอีก รอยต่อโจเซฟสันนี้ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. 2505 โดย Brain Josephson รอยต่อโจเซฟสันประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ส่วน ที่ถูกแยกด้วยชั้นกั้นฉนวนบางๆ เราใช้การ

เปลี่ยนแปลงระดับของกระแสในกรณีที่ใช้รอยต่อโจเซฟสันเป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิทช์ โดยรอยต่อโจเซฟสันมีคุณสมบัติดังนี้ คือ

1. ความเร็วในการสวิทช์จาก Zero Resistance ไปเป็น Positive Resistance ประมาณ $1/10^{12}$ ของวินาที

2. สามารถควบคุมด้วยอุปกรณ์กำลังต่ำๆ ได้ เพราะเป็นการควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กและตัวรอยต่อเอง มีการสูญเสียกำลังต่ำมาก

3. สามารถนำไปเป็นหน่วยความจำของระบบการประมวลผลต่างๆ ได้ เพราะคุณสมบัติที่

- ไม่มี Voltage ตกคร่อม Function เมื่อเป็นสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- มี Voltage ตกคร่อม Function เมื่อเสียสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ปัจจุบันได้มีการนำไปทดลองใช้เป็นวงจร OR , AND gate โดยสร้างเป็น Array of Josephson Cell ที่ Data ควบคุมด้วยสนามแม่เหล็กและนำไปสร้าง Oscilloscopes ทำให้มี Bandwidth สูง เช่น เครื่อง PSP - 750 Oscilloscope ที่มี Bandwidth 70 GHz , 50 μ V Sensitivity ของบริษัท Hypres Inc, NEW YORK , 1987 เพื่อใช้ในงานด้านความถี่ไมโครเวฟ

1.3.2 งานด้านระบบกำลัง

ระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งเริ่มจากเครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่ภาคจ่ายกำลังผ่านเครื่องจ่ายไปสู่ผู้บริโภคนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายและพลังงานได้มาก เมื่อใช้สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแทนระบบทั่วๆ ไปที่ใช้กันอยู่

เครื่องกำเนิดแรงดัน (Generator) ที่พันด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ให้กระแสเท่ากับที่ใช้ตัวนำธรรมดา จะทำให้ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่ากระแสที่ผลิตได้จะถูกจ่ายออกไปตามโครงข่ายที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหลัก ทำให้ความสิ้นเปลืองลดลงจากระบบทำงานปกติซึ่งจะต้องสูญเสียไปประมาณ 20 % ของไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดขึ้น

เมื่อพลังงานไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นมาครั้งๆ หนึ่ง จะถูกส่งไปยังผู้บริโภคเท่าที่มันผลิตได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากปัจจุบันไม่มีวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บพลังงานจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีการประมาณว่า ผู้บริโภคจะใช้ปริมาณเท่าใด และปรับการผลิตให้เหมาะสมตามความต้องการตามการคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีที่ผู้บริโภคต้องการกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าปกติ จะมีพลังงานบางส่วนเหลือ การใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสามารถแก้ปัญหาส่วนนี้เพื่อลดการสูญเสียไปได้ Omnes ที่ได้เห็นยวนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ลดลงเลยเมื่อเวลาผ่านไป เราจึงสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้ยาวนาน ระบบ SMES จะถูกค่ออยู่กับโครงข่ายเอกสาร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญเห็นไปไปยังระบบงานการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง ในช่วงเวลาที่ความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีจำนวนน้อย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกนำเข้าสู่ อุปกรณ์ SMES และในระหว่างที่ปริมาณไฟฟ้ามีความต้องการอย่างมาก กระแสไฟฟ้าที่อยู่ในระบบ SMES ก็จะกลับเข้าสู่ระบบกำลัง

ประโยชน์ของการนำสภาพไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเก็บ และการกระจายพลังงานเท่านั้น สภาพควานำไฟฟ้ายิ่งยวด ยังมีประโยชน์ในการพัฒนาระบบ และ อุปกรณ์ไฟฟ้าด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องซักผ้า เครื่องล้างจาน และเครื่องเป่าผม ในวันหนึ่งข้างหน้า อาจจะสร้างด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบควานำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งใช้พลังงานน้อยลง และมีขนาดเล็กมาก

1.3.3 งานด้านวิทยาศาสตร์และการแพทย์

สาขาวิทยาศาสตร์และการแพทย์จะได้รับผลดีอย่างมากจากสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยเฉพาะในส่วนของที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรง และการตรวจจับสนามแม่เหล็ก อื่นๆ

นักฟิสิกส์นั้นได้ใช้ประโยชน์ของแม่เหล็กไฟฟ้าควานำไฟฟ้ายิ่งยวดมานานแล้วสำหรับ ใช้กำเนิดสนามแม่เหล็กกำลังแรงเพื่อศึกษา การชนของอะตอม ในห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์นัก ฟิสิกส์ได้พยายามสร้าง magnetic bottle เพื่อเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่น โดยใช้แม่เหล็กควานำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยหวังว่าอนาคตอันใกล้นี้จะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่สามารถเก็บปฏิกิริยาฟิวชั่นได้

สควิดส์ (SQUIDS) เป็นชื่อย่อของ Superconduction Quantum Interference Device สควิดส์ประกอบด้วยรอยต่อ โจเซฟสันเป็นชั้นแบบแซนวิชของฉนวนชั้นบางได้ตามขบวนการที่เรียกว่า Tunneling ถ้าสควิดส์นี้ถูกวางไว้ในสนามแม่เหล็ก แรงดันของกระแสที่มีการไหลผ่านตัวมัน จะเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็ก สควิดส์เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวสูงสำหรับการ วัดค่าสนามแม่เหล็ก สควิดส์จึงมักถูกอ้างอิงถึงบ่อยๆ เช่น ในแมกนีโตมิเตอร์ (magnetrometer)

เครื่องมือสร้างภาพอวัยวะภายในร่างกาย

ในทางการแพทย์สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกนำมาใช้ในเครื่องมือสร้างภาพ ได้แก่ เครื่อง NMR (Nuclear Magnetic Resonance) หรือ MRI (Magnetic Resonance Imaging) ซึ่ง สามารถสร้างรายละเอียดของอวัยวะภายในภาพของ MRI คล้ายกับ CAT (Computerized Axial Tomography Scanning) เป็นระบบที่ใช้ข้อมูลจากรังสีเอ็กซ์ในหลายๆ มุม แต่ CAT ไม่มีความไวต่อ เนื้อเยื่ออ่อนและต้องใช้การแผ่รังสีซึ่งมีอันตรายต่อร่างกาย ส่วน MRI นั้นมีไวสูงมากกับเนื้อเยื่อ อ่อนและไม่ต้องผ่านการแผ่รังสีเพราะใช้สนามแม่เหล็กแรงๆ ที่สร้างขึ้นโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลักการของ MRI

เมื่อร่างกายของคนถูกฉายด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โปรตรอนในน้ำและอนุภาคอื่นๆ จะเรียงตัวให้มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก จากนั้นจะป้อนพลังงานความถี่วิทยุที่ความถี่รีโซแนนซ์ที่เหมาะสมเพื่อทำให้โปรตรอนถูกกระตุ้น เมื่อลดการป้อนพลังงานลง โปรตรอนจะกลับมายังสถานะเดิม และคายพลังงานออกมาพลังงานนี้จะถูกตรวจจับ และประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แล้วนำมาสร้างภาพ อุปกรณ์ MRI ปัจจุบันใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก นอกจากนี้ MRI ยังสามารถใช้เป็นเครื่องวัดการไหลของเลือดในบริเวณศีรษะและคอ โดยไม่มีผลกระทบต่อคนไข้ ให้สะดวกในการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวกับเส้นโลหิตในสมองและระบบประสาท การใช้ MRI ร่วมกับการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อตรวจเนื้อเยื่อหัวใจ เพื่อรักษาผู้ป่วยโรคหัวใจ

1.3.4 การคมนาคม

สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถนำมาใช้กับการคมนาคมได้หลายทาง แม่เหล็กตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถใช้กับรถไฟพิเศษที่วิ่งเหนือรางสามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วมาก มอเตอร์ตัวนำไฟฟ้าก็จะถูกนำไปใช้ในเรือและเรือดำน้ำ

รถไฟแมกเลฟ (Maglev Trains) เป็นรถไฟที่มีความเร็วสูงมาก มักจะลอยเหนือรางประมาณ 4 นิ้ว บนเบาะรองแม่เหล็ก ซึ่งทำให้ไม่มีความเสียดทานที่ล่อมาจำกัดความเร็ว รถไฟแมกเลฟใช้กฎแม่เหล็กธรรมดา คือ ขั้วของแม่เหล็กเหมือนกันผลักกันระบบของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบ แม่เหล็กส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้เพื่อยกตัวรถไฟ และอีกส่วนถูกใช้เพื่อการขับเคลื่อนตามทิศทางที่ต้องการ ในรถไฟแมกเลฟของญี่ปุ่นนั้นได้ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำซึ่งต้องมีอุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงก็จะสามารถลดอุปกรณ์ทำความเย็นที่หนักมากนี้ได้ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงระยะหลังนี้ใช้ระบบทำความเย็นจากไนโตรเจนเหลวก็พอเพียง แต่มันก็ยังมีปัญหาด้านคุณสมบัติบางอย่างที่จำกัด

1.3.5 การทหาร

การใช้ประโยชน์ในด้านการทหารก็เกี่ยวข้องกับหลักการต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว งานวิจัยในด้านการทหาร ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถนำไปใช้ได้บนเรือรบทหาร และเรือดำน้ำ เรือขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ซึ่งมีส่วนประกอบของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิต่ำ ได้เคยถูกสร้างทดสอบเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับใช้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

Rial Guns หรือตัวจับมวล ใช้เพื่อเร่งกระสุนปืนใหญ่เพื่อให้มีความเร็วสูงมาก หลักการง่ายๆ คือ กระสุนจะถูกเร่งอย่างทันทีตามทางที่ใช้วงแหวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด Rial Guns นี้จะถูกนำไปติดตั้งบนรถถังหรือเรือ นอกจากนี้ก็ยังมี Lasers และอุปกรณ์จำพวกตัวเอกสารที่เป็นเอกสารที่ส่งวงไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับยูทเทิน ไปเซประเขตนการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีความสำคัญมาก สามารถถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและนับว่าเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กำลังจะเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีปัจจุบัน ปัจจุบันสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีการค้นคว้าและค้นพบขยายวงกว้างออกไปทั่วโลกขณะที่นักวิทยาศาสตร์เร่งการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ค้นพบใหม่ๆ ในแต่ละวันวิศวกรก็กำลังพยายามเปิดช่องทางเข้าสู่เทคโนโลยีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อการใช้งาน บริษัทเอกชนต่างๆ กำลังมองหาโอกาสและช่องทางการค้าที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นการแข่งขันระหว่างห้องปฏิบัติการบริษัทและนักวิจัยจึงเพิ่มมากขึ้น

การพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อให้ใช้ได้ที่อุณหภูมิห้องจะเป็นสิ่งที่จำเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมเทคโนโลยีการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นอย่างมาก ซึ่งห้องปฏิบัติการหลายแห่งกำลังศึกษาและรายงานอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อพยายามสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้องจริงๆ นอกจากนี้ความพยายามส่วนมากยังมุ่งตรงไปที่การพัฒนาประยุกต์ใช้งานสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง



บทที่ 2

คุณสมบัติและหลักการของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1.1 สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconductivity)

การที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะคงสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ต้องอยู่ภายใต้คุณสมบัติ 3 ประการดังต่อไปนี้

1. กระแสที่ป้อนให้เพื่อการ Bias ให้ทำงานต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

$$I_a \leq I_c \quad (2.1)$$

โดย I_c คือค่ากระแส Bias สูงสุดที่ถูกทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวด ให้กลายเป็นตัวนำธรรมดา

2. สนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับ Superconductor ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับสนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field)

$$H_a \leq H_c \quad (2.2)$$

โดย H_c คือค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เริ่มจะทำลายสภาพการเป็นตัวนำยิ่งยวด

3. อุณหภูมิที่ใช้ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

โดย T_c คือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เริ่มจะทำลายสภาพความเป็นตัวนำยิ่งยวด การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สามารถทำได้โดยให้

$$I_a \leq I_c \quad (2.3)$$

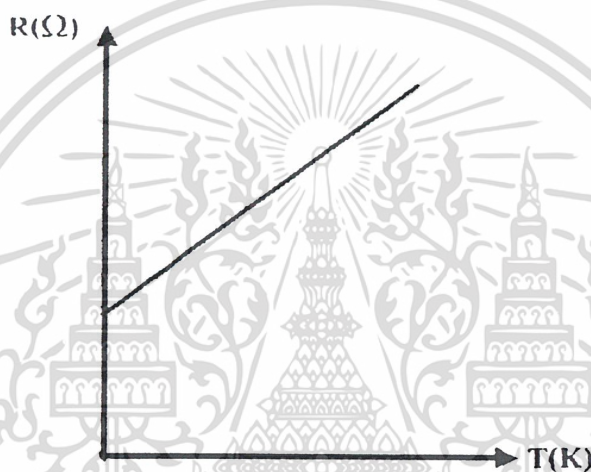
$$H_a \leq H_c \quad (2.4)$$

$$T_a > T_c \quad (2.5)$$

2.1.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance)

ความต้านทานไฟฟ้ามักจะลดลงเมื่อโลหะหรือ Alloy ถูกทำให้เย็นลง เมื่ออุณหภูมิค่าลดลง ความต้านทานของอะตอมจะลดลง และการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจะน้อยกว่าค่าความถี่ของการเคลื่อนที่ที่มีการกระจัดกระจาย ความต้านทานมีการลดลงเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิให้มีค่าประมาณหนึ่งในสามตามคุณลักษณะของอุณหภูมิ (Debye temperature) ของวัสดุแต่ความต้านทานที่ลดลงรวดเร็วอย่างต่อเนื่องนี้ยังน้อยกว่าการลดลงของอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด (ตามรูปที่ 2.1) สำหรับโลหะบริสุทธิ์นั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จะถูกต่อต้านเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างและความต้านทานจะเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิลดลงเป็นศูนย์ ได้ถูกสมมติให้เป็นตัวนำที่การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบูรณ์ เมื่อถูกทำให้เย็นลงจนถึงค่าอุณหภูมิศูนย์สมบูรณ์ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ชั้นสารของโลหะอื่นๆ ไม่สามารถทำให้บริสุทธิ์อย่างสมบูรณ์ได้ แม้จะมีสิ่งเจือปนอยู่บ้าง คังนั้นอิเล็กตรอนซึ่งจะเคลื่อนที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอะตอมจะเคลื่อนที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะมากกว่าหรือน้อยกว่าขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิ จากเหตุผลนี้จึงมี “สภาพความต้านทานคงค้าง (residual resistivity)” ซึ่งยังคงหลงเหลืออยู่แม้จะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำที่สุด โลหะที่มีความบริสุทธิ์น้อยมากขึ้นเท่าใดก็จะมีสภาพความต้านทานคงค้างมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ

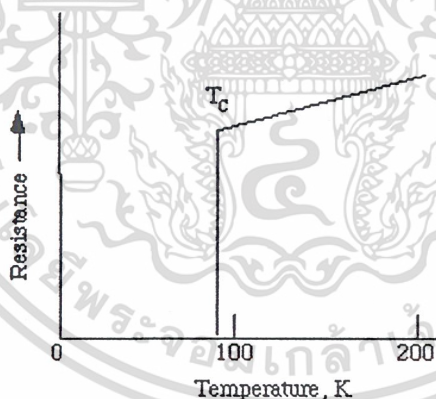
โลหะจะมีคุณสมบัตินี้อย่างเห็นได้ชัดเมื่อมันถูกทำให้เย็นลง ความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงตามปกติ แต่ถ้าอยู่ที่อุณหภูมิ 2-3 องศาเหนืออุณหภูมิศูนย์สมบูรณ์แล้วมันจะสูญเสียความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดในทันที กล่าวได้ว่ามันจะอยู่ในสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การเปลี่ยนไปสู่สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเกิดขึ้นแม้ว่าโลหะจะไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับความต้านทานคงค้างขนาดใหญ่

2.1.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (Superconduction Transition Temperature)

อุณหภูมิที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสูญเสียความต้านทานนี้ เรียกว่า สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรืออุณหภูมิวิกฤต (critical temperature : T_c) อุณหภูมินี้จะมีความแตกต่างในโลหะแต่ละชนิด โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลกระทบต่อสารเจือที่มีปริมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงเล็กน้อย ถึงแม้สารเจือที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงก็ตาม ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของโลหะบางชนิดอยู่ในสถานะที่มีความบริสุทธิ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำมากและอาจถูกทำลายโดยปริมาณของสารเจือแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย ดังนั้นธาตุเหล่านี้จะเป็นเพียงการยับยั้งสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ถ้ามีความบริสุทธิ์อย่างมากและชิ้นสารของโลหะตัวนำธรรมดาเหล่านี้ที่เป็นทางการค้าจะไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โลหะบริสุทธิ์ไม่ทั้งหมดที่จะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะไม่แสดงสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้ลดลงจนถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่เคยได้รับความเย็นมาก่อน

สำหรับสาร Alloy จะเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แม้ว่าส่วนประกอบของมันจะประกอบด้วยโลหะ ซึ่งโดยตัวของโลหะเหล่านี้เองไม่ได้เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถแสดงได้โดยตัวนำที่ไม่ใช่โลหะ สำหรับสารที่อยู่ในสภาพที่ได้รับความเย็นที่มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะเกิดขึ้นถ้าชิ้นสารตัวอย่างนั้นบริสุทธิ์และมีสภาพสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าชิ้นสารไม่บริสุทธิ์หรือ โครงสร้างผลึกถูกรบกวนจะทำให้การเปลี่ยนสภาพอาจจะกว้างมากขึ้น



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความต้านทานทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1.4 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature)

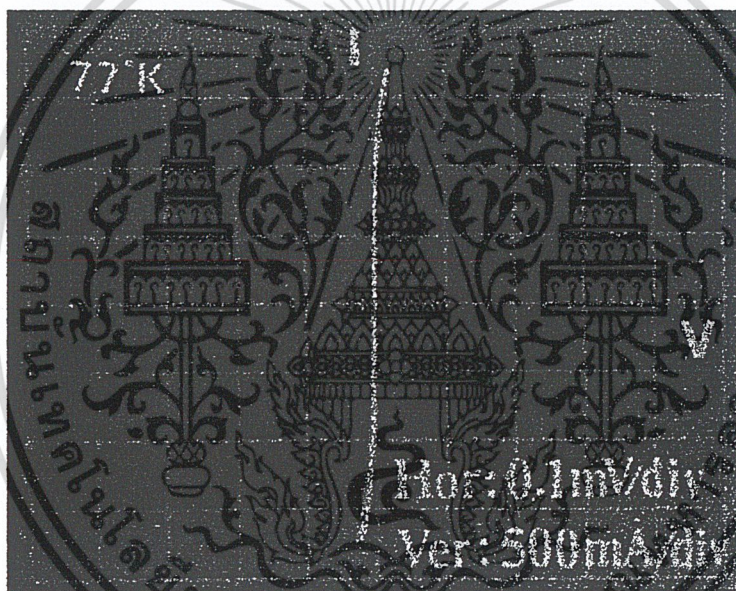
จากการที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมินั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความต้านทานลดลงจนถึงอุณหภูมิต่ำที่ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิวิกฤตนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและมีค่าคงที่ เช่น โลหะที่มีความบริสุทธิ์นั้นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่ำมาก เมื่อเติมสารเจือทางแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยจะทำให้ อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก อุณหภูมิวิกฤตนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการศึกษาตัวนำไฟ

เอกสารฉบับนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ผ่านการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟยิ่งยวดอุณหภูมิสูง ถ้าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดใดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงๆ จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ดีขึ้นเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานและคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถยอมรับได้ สามารถนำไปพิจารณาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้อีกมากมาย

2.1.5 ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect)

ปรากฏการณ์ซิลสบี คือ ปรากฏการณ์การทำลายสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยกระแสที่ผ่านเข้าไปในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤตทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกลายเป็นตัวนำธรรมดา

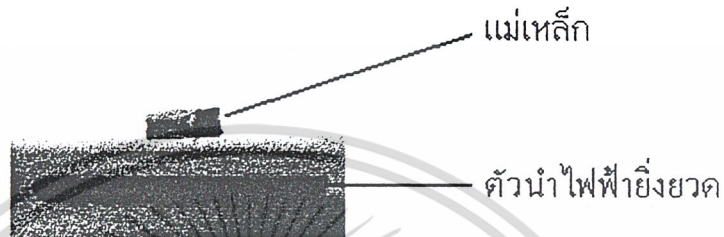


รูปที่ 2.3 V-I ขณะเกิดปรากฏการณ์ Silsbee effect

จากรูปแสดงเส้นกราฟในจอของออสซิลโลสโคปจะอยู่ในแกน Y จากนั้นค่อยเพิ่มกระแสให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีก สังเกตเส้นกราฟจะค่อยๆ เบนออกจากแกน Y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มถูกทำลาย ตัวรูปค่ากระแสสูงสุดที่ทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดเรียกว่า กระแสวิกฤต (I_c)

2.2 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.2.1 ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)



รูปที่ 2.4 แสดงปรากฏการณ์ไมเนอร์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปรากฏการณ์ไมเนอร์ เป็นคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กที่สำคัญอย่างมากในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพราะใช้ทดสอบการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอย่างง่าย ๆ จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่มีความต้านทานทางไฟฟ้าทำให้เมื่อกระแสไหลผ่านจะไม่เกิดแรงดัน และไม่เกิดการสูญเสียความร้อนภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ไม่มีไฟฟ้าแม้จะป้อนสนามแม่เหล็กจากภายนอก สนามแม่เหล็กที่เคยอยู่ภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ จากรูปที่ 2.5 (a) เมื่อนำวัสดุทรงกลม (ยังไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด) อยู่ในอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก แล้ววัสดุทรงกลมนั้นจะเป็นตัวนำไฟฟ้าธรรมดา เส้นแรงแม่เหล็กจึงสามารถซึมทะลุผ่านเข้าไปในทรงกลมได้ จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิทรงกลมให้ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต จนทำให้วัสดุทรงกลมนี้มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด สนามแม่เหล็กภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะต้องเป็นศูนย์เสมอและไม่ขึ้นกับขั้นตอนการลดอุณหภูมิหรือการป้อนสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ ทรายใดที่อุณหภูมิมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิวิกฤต เส้นแรงแม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องมีลักษณะดังรูป 2.5 (b) เสมอ ผลที่เกิดในลักษณะนี้ทำให้ทราบว่าตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่เพียงแต่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ (Perfect Conductor) เท่านั้นแต่ในขณะเดียวกันก็เป็นแม่เหล็กได้อาอย่างสมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) ด้วย ซึ่งไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กซึมซาบเข้าไปภายใน คุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กได้อาอย่างสมบูรณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไมเนอร์ (Meissner Effect)



รูปที่ 2.5 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทรงกลมที่อุณหภูมิต่างๆเมื่อ
(a) อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (b) อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

2.2.2 กระแสคงสภาพ (PERSISTENT CURRENT)

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กอ่อนนั้น จะประพืดตัวเสมือนสารแม่เหล็ก diamagnetic กล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาต่อต้านเพื่อหักล้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก โดยอาศัยกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตามกฎของ Lenz's law ซึ่งสนามแม่เหล็กนั้นจะไม่ไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ทำให้สนามแม่เหล็กภายในเป็นศูนย์โดยจะผลักความเข้มเส้นแรงแม่เหล็กออกจากตัวมันทันที เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์ไมสเนอร์ (Meissner Effect)”

จากการที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นมีความต้านเป็นศูนย์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำจะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพ (persistent current) ไหลวนอยู่ในผิวของขั้วขั้วสาย กระแส (I) ซึ่งไหลต่อเนื่องกันที่ผิวที่เป็นวงจรรปิด จากการพิจารณาโครงถึงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่เป็นวงแหวน ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์เมื่อมีฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก $\Phi = AB_x$ ตามรูปที่ 2.6 (ก) จะก่อให้เกิดกระแสคงสภาพไหลวนอยู่รอบวงแหวนในทิศทางเดียวกันกับฟลักซ์ของแม่เหล็ก (B_x) ในวงแหวนเพิ่มขึ้น ที่ทำให้มีการหักล้างฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอก (B_{ext}) ขณะที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงจะได้ว่า

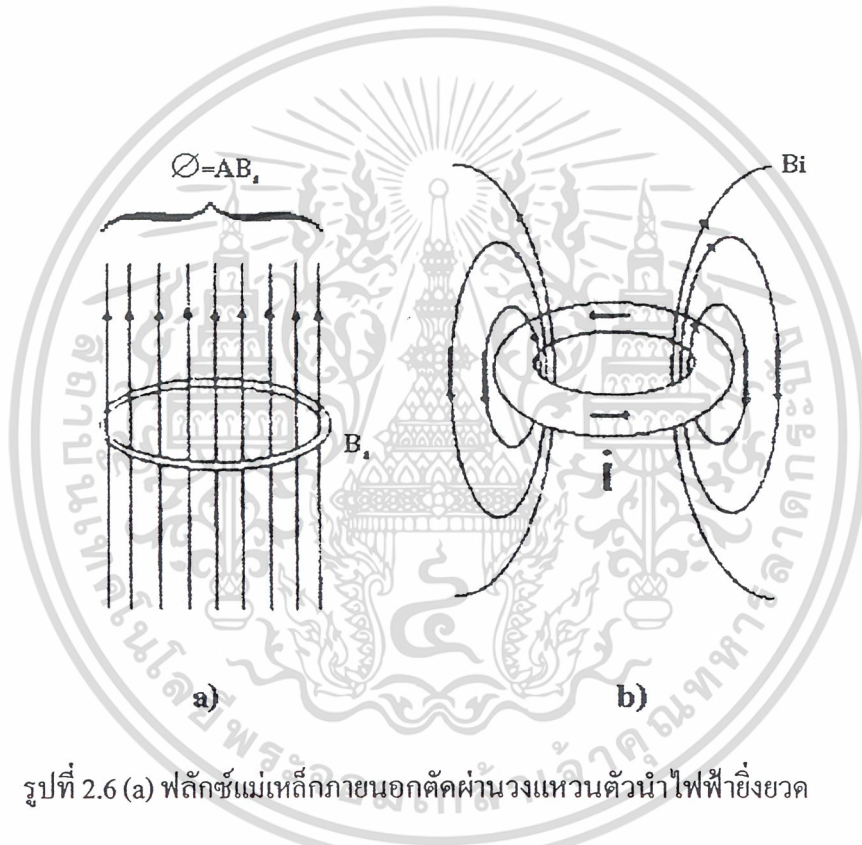
$$EMF = -A(dB_x/dt) = Ri + L(di/dt) \quad (2.6)$$

เมื่อ R และ L เป็นความต้านทานรวม และค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรในสภาพความต้านทานปึกคึกจะมีการนำกระแสอย่างรวดเร็ว และจะค่อยๆ ลดไป ซึ่งฟลักซ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในวงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหวนจะเปลี่ยนเป็นค่าใหม่ซึ่งในสภาพของวงจรที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น สภาพความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ดังนี้

$$-A(dB_a/dt) = L(di/dt) \quad (2.7)$$

$$Li + Ab_a = \text{const} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.6 (a) ฟลักซ์แม่เหล็กภายนอกตัดผ่านวงแหวนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

(b) ฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้านและกระแสดังสภาพในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากสมการที่ 2.8 นี้พบว่าผลรวมของฟลักซ์แม่เหล็กในวงจรมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าเส้นแรงฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีการเหนี่ยวนำกระแสให้หมุนเป็นวงกลม ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (B_1) ที่ภายในชิ้นสารนั้นมีความเท่าเทียมกันในทุกพื้นที่และมีทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นแรงของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะกระจายออกไปอยู่ที่ผิวภายนอกของเนื้อสารตามรูปที่ 2.6 (b) ซึ่งเป็นตัวนำไปสู่การป้องกันฟลักซ์แม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กภายนอกไม่ให้เข้าไปในเนื้อสาร ผลดังกล่าวนี้เป็นผลของ diamagnetic ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ปฏิกิริยาการกระทำของสภาพในค่านำไฟฟ้ายิ่งยวด (PERSISTENT CURRENT EFFECT)

พิจารณาห่วงแหวนถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงแหวนนั้น โดยเป็นไปตามกฎของเลนซ์ (Lenz's law) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$-A(dB/dt) = RI + L(di/dt) \quad (2.9)$$

โดยการแทนที่ R แทนค่าความต้านทานของวงแหวน

L แทนค่าความเหนี่ยวนำของวงแหวน

A แทนพื้นที่หน้าตัดภายในวงแหวน

สมการที่ 2.9 ยังคงเป็นจริงในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$0 = RI + L(di/dt) \quad (2.10)$$

ถ้าให้ (I_0) แทนค่ากระแสเริ่มต้นจะได้ว่า

$$I = I_0 \exp(-Rt/L) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 จะเห็นว่ากระแสที่ไหลในวงแหวนจะคงที่ตลอดเวลา เรียกว่า กระแสคงสภาพ (persistent current) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงแหวนจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ LI ในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกด้วย ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมดที่ผ่านในวงแหวนจะเป็น

$$\Phi = AB + LI \quad (2.13)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 2.13 จะได้เป็น

$$(d\Phi/dt) = -A(dB/dt) + L(di/dt) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.9 และ สมการที่ 2.14

$$(d\Phi/dt) = -RI \quad (2.15)$$

2.2.4 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c)

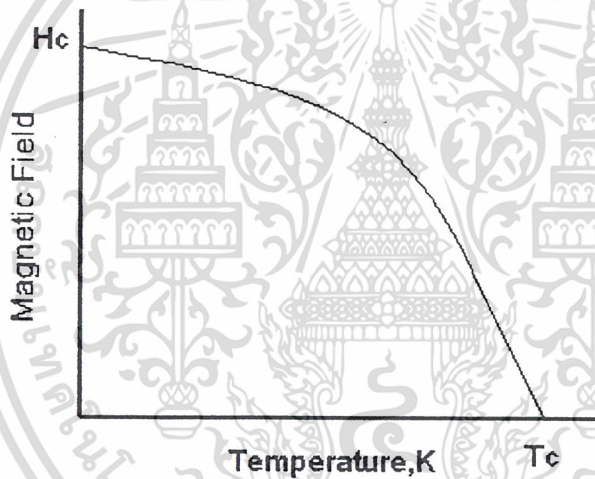
จากการผ่านสนามแม่เหล็กไปยังตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดพบว่า สนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้กลายเป็นสภาพปกติ (Normal State) ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้พอดีนั้นจะเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field : H_c) และพบว่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในโอกาสพิเศษ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_C = H_0 [1 - (T/T_C)^2] \quad (2.16)$$

- เมื่อ H_C = สนามแม่เหล็กวิกฤต
 H_0 = สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน
 T = อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต
 T_C = อุณหภูมิวิกฤต

ด้วยเหตุนี้เองค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจึงถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตที่อุณหภูมินั้นๆ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.7 ถ้าโลหะมีค่าสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิที่สอดคล้องกันภาวนได้เส้นแผนภาพเฟส (Phase Diagram) โลหะนั้นยังคงสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ แต่ถ้าต้องการให้กลับไปสู่สภาพปกติก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มสนามแม่เหล็กหรือเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มทั้งสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิพร้อมกันได้

2.2.5 การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดวิธีหนึ่งคือ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า T_c และอีกวิธีหนึ่ง ก็คือ เพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปมากๆ จนกระทั่งมากกว่าสนามวิกฤต $H_c(T)$ ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิ จะสามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ที่อุณหภูมิวิกฤต (T_c) ค่าของสนามวิกฤตเป็นศูนย์คือ $H_c(T_c) = 0$ ความสัมพันธ์ของสนามวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.8 มีความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤต และอุณหภูมิของธาตุต่างๆ

- เมื่อ $T < T_c$ สนามภายนอก $H_a = 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- $T < T_c$ สนามภายนอก $H_c > H_a > 0$ เป็นสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- $T < T_c$ สนามภายนอก $H_a > H_c$ เป็นสภาวะปกติ คือการทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $T = T_c$ ถ้าให้สภาพแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ แต่ถ้า $T \ll T_c$ ต้องใช้สนามแม่เหล็กมากๆ สำหรับ $T = T_c$ ได้ $H_c = 0$ ความสัมพันธ์ระหว่างสนามวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต สามารถเขียนเป็น

$$H_c(T) = H_c(0)[1 - (T/T_c)^2] \tag{2.17}$$

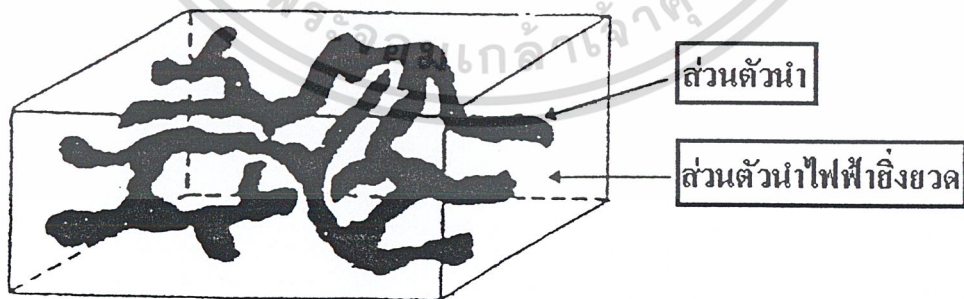
ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตถูกใช้เป็นตัวจำกัดกระแสไฟฟ้าที่จะให้ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มากจนทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับค่าสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมินั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิ และให้สนามแม่เหล็กค่าสูงๆ สามารถทำลายสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งแล้ว เราอาจจะทำลายสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งได้อีกด้วยกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากๆ จนมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมากกว่าสนามวิกฤตก็จะทำลายสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งได้ การทำลายสภาพการนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งด้วยกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect)

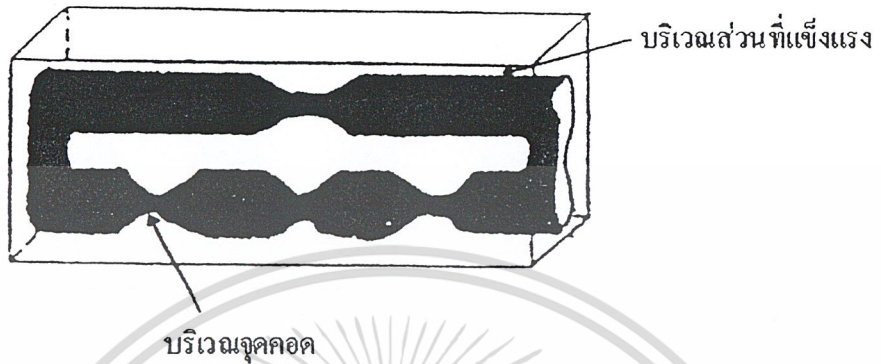
2.3 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

เนื่องจากตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งสูงได้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของสารเซรามิคดังนั้นสารดังกล่าวจึงประกอบไปด้วยส่วนสองส่วน กล่าวคือ ส่วนตัวนำไฟฟ้าปกติ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 (a) ซึ่งส่วนที่ไม่ใช่สีดำหมายถึงส่วนตัวนำไฟฟ้าปกติ และส่วนที่ดำปกติคือ ตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งซึ่งมีลักษณะที่ซับซ้อน และต่อเนื่องกันทั้งชิ้นสารแต่อาจจะมีลักษณะเส้นทางนำไฟฟ้าที่กว้างและแคบ โดยส่วนที่แคบจะถูกพิจารณาเป็นบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกันอย่างหลวมหรือส่วนคอด หรืออีกนัยหนึ่งคือ บริเวณที่ตัดออกเป็นส่วนแรก เมื่อสภาวะนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งถูกทำลายภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น การไบอัสกระแสปริมาณมาก และการมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ สามารถเขียนแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.9 (b) โดยคิดว่าส่วนนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งถูกวางตัวในแนวนอน และที่ปลายทั้งสองด้านของชิ้นสารถูกนำมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นเหตุผลให้แรงดันตกคร่อมเป็นศูนย์เมื่อมีกระแสไบอัสชิ้นสารค่าน้อยๆ



(a) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) แบบจำลองอย่างง่าย

รูปที่ 2.9 แบบจำลองของสารเซรามิกนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองและการประยุกต์ใช้งาน

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ เป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

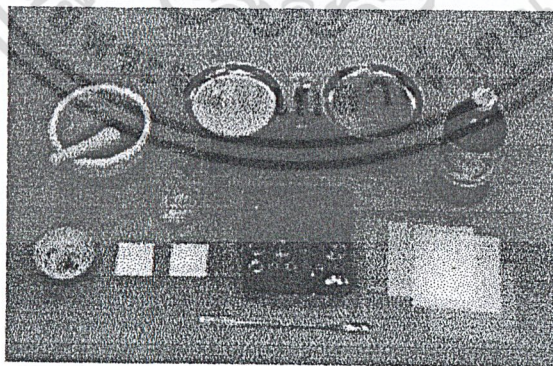
3.1 กระบวนการสร้างสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

3.1.1 การเตรียมสารเคมี

สามารถเตรียมได้จากสารประกอบอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.99%, แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.99% , คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ความบริสุทธิ์ 99.99% นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกัน โดยมีอัตราส่วนของธาตุ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 ซึ่งสามารถสร้างสารประกอบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับผสมและใส่สารที่จะเผา

- (1) เครื่องชั่ง 2 แฉก
- (2) ครกบดสาร
- (3) ถ้วยเผาทนความร้อน
- (4) ช้อนตักสารและกระดาษพาราฟิล
- (5) อุปกรณ์จำเป็นอื่นๆ เช่น กระบือ่งเซรามิกทนความร้อน เป็นต้น



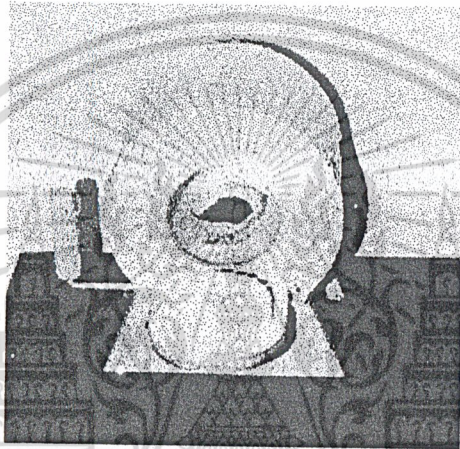
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับผสมสารในกระบวนการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เตาเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง 1,050 องศาเซลเซียส

ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ตัวเตาเผาชนิดลวดความร้อน เป็นเตาเผาขนาดเล็ก ที่ใช้ขดลวดความร้อนแบบ VTR – E ลักษณะเตาเป็นทรงกระบอก ประกอบด้วย เป้าเซรามิกทนความร้อนพันด้วยขดลวดความร้อน เตาเผาแบบขดลวดความร้อนนี้ ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลท์ ไม่มีชุดควบคุมอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เตาเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงถึง 1,050 องศาเซลเซียส

2. หัววัดอุณหภูมิเตาเผา ประกอบด้วยหลอดเซรามิกทนความร้อนสำหรับใส่หัววัดเข้าไปในเตาเผา และหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K , Chromel Alumel)

3. ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดควบคุมอุณหภูมิ ใช้ Electronic Temperature Controller ซึ่งใช้ได้กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 – 12,000 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิของเตาให้คงที่ ด้วยการส่งสัญญาณ ON – OFF จาก Controller ไปยัง Electromagnetic Switch เพื่อทำการตัด - ต่อ ไฟเลี้ยงขดลวดความร้อนของเตาเผาความผิดพลาดของอุณหภูมิของเตาประมาณไม่เกิน ± 20 องศาเซลเซียส

3.1.4 ขั้นตอนการเผาสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

(1) ซังสารประกอบ $Y_2O_3BaCo_3$ และ CuO โดยอัตราส่วนธาตุ $Y : Ba : Cu : O$ เป็น 1 : 2 : 3

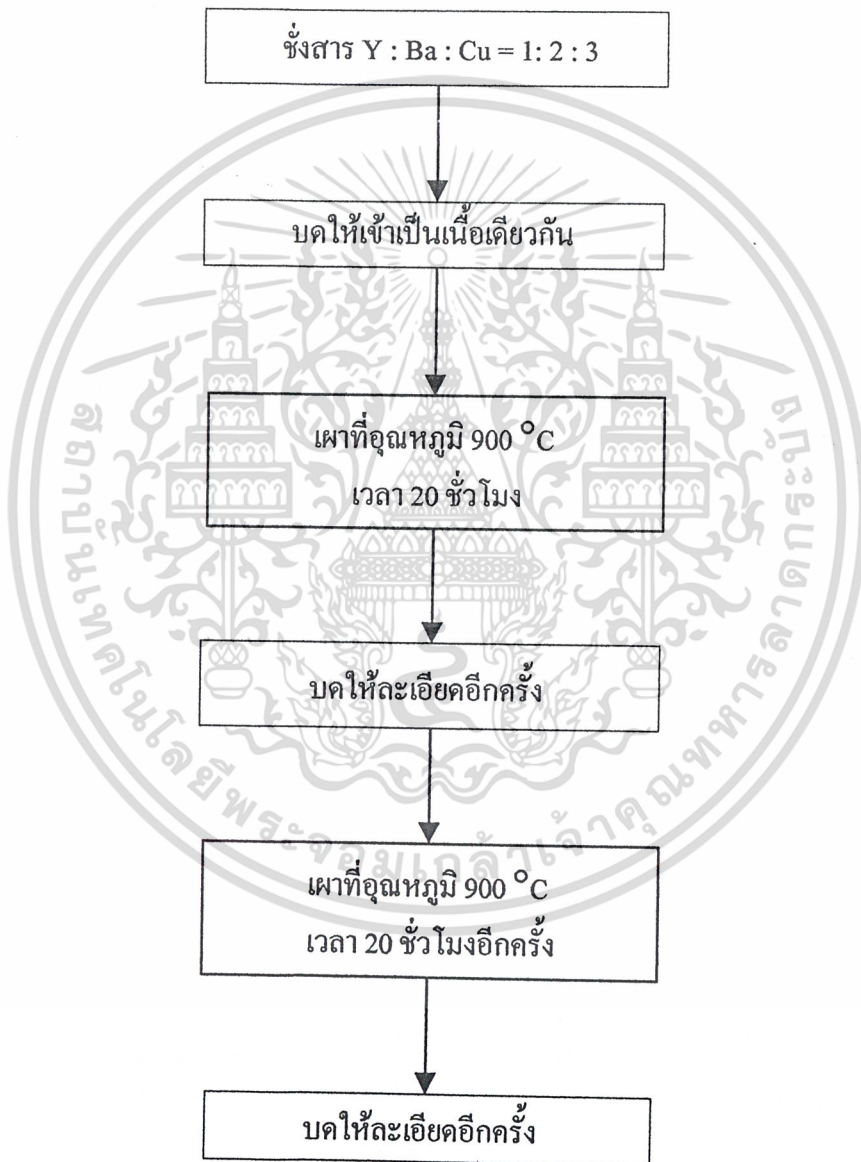
(2) บดสารประกอบทั้ง 3 ชนิดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง

(3) ตักสารผสมใส่ถ้วยทนไฟ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง

(4) นำสารที่เผามาตัดส่วนสีเขียวออก จากนั้นนำสารมาบดให้ละเอียดอีกครั้ง

(5) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส นาน 20 ชั่วโมงอีกครั้ง

(6) บดให้ละเอียดอีกครั้ง

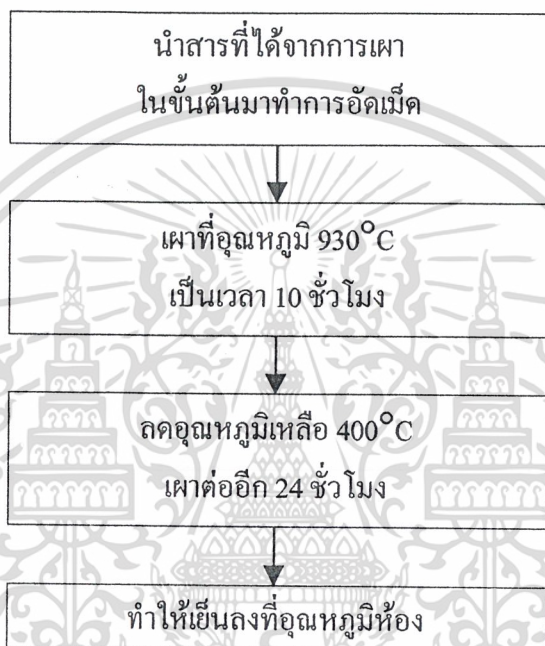


รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเผาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

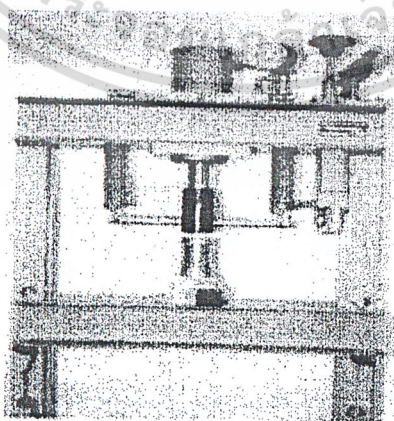
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

- (1) นำสารที่ได้จากการเผาในขั้นต้นมาทำการอัดเม็ด เม็ดละ 1 กรัม ที่แรงดัน 1 ตัน
- (2) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 930 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- (3) ลดอุณหภูมิเหลือ 400 องศาเซลเซียส เผาต่อไปอีกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (4) ทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการเผาเม็ดชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเม็ดสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

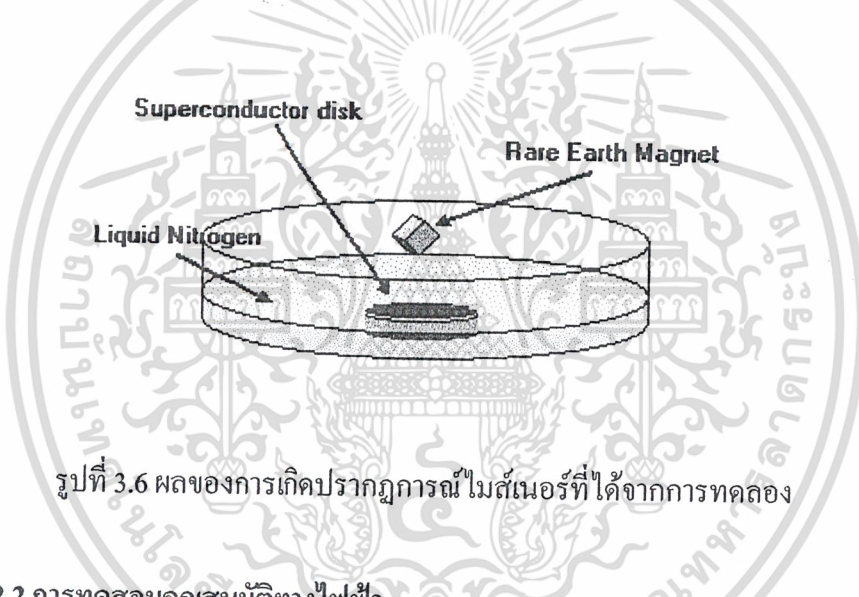
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบการมีสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

หลังจากได้ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการอัดเม็ดแล้ว ต้องทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ว่าชิ้นสารที่ได้มีคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือไม่

3.2.1 การทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (MEISSNER EFFECT)

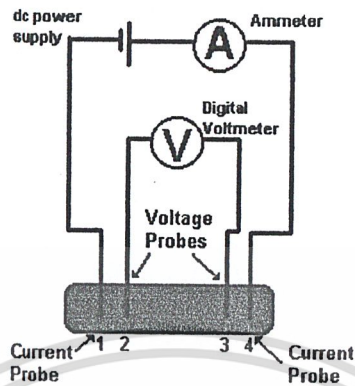
เป็นวิธีทดสอบพื้นฐานของการมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยการนำเม็ดสารที่ผ่านการเผาแล้วไปลดอุณหภูมิในไนโตรเจนเหลว เมื่อเม็ดสารเกิดมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ โดยการผลักแม่เหล็กให้ลอยเหนือเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยแม่เหล็กสำหรับทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และปรากฏการณ์ทางแม่เหล็ก ที่นำมาใช้เป็นแม่เหล็กแบบซามาเรียมบอลต์ (Sm – Co) ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าแม่เหล็กทั่วไป เพื่อความชัดเจนในการแสดงผล



รูปที่ 3.6 ผลของการเกิดปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ที่ได้จากการทดลอง

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เพื่อใช้หาค่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเร็วขึ้น โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสที่ปรับค่าได้ แล้ววัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยจะมีวงจรวัดดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

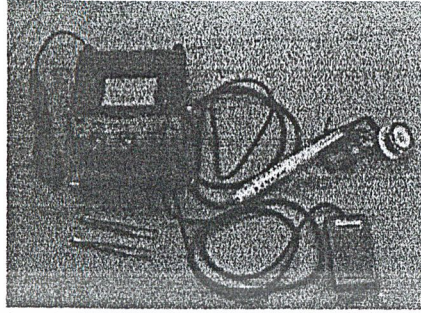
1. ชุดวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซึ่งต้องมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้จะเป็นการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ชุดทดลองจะประกอบด้วย

1. แหล่งจ่ายกระแส
2. ชิ้นสารตัวอย่างซึ่งต่อสายไฟเรียบร้อยแล้ว
3. ไนโตรเจนเหลว
4. Nanovolt Meter

2. ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง

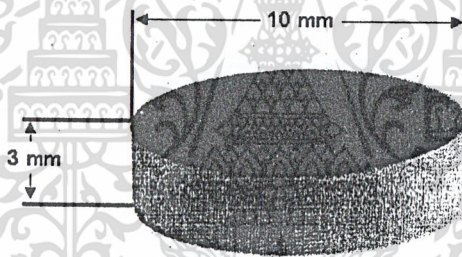
ในการบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำเข้ากับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก จะต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็น โอห์มมิก ชุดบัดกรีประกอบด้วยตะกั่วบัดกรีจุดหลอมเหลวต่ำ ซึ่งมีส่วนผสมของอินเดียม และชุดควบคุมอุณหภูมิหัวแร้ง



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับบัดกรี ต่อสายตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดเซรามิก

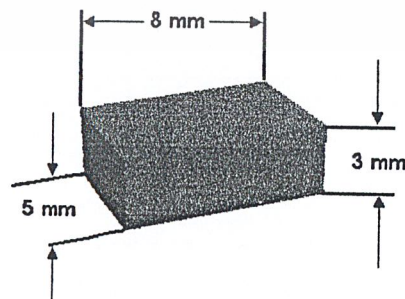
3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

3.3.1 ลักษณะการขึ้นรูปของชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 3.9 ชั้นสารที่ทำการอัดเม็ด

นำชั้นสารที่ได้ทำการอัดเม็ดมาตะไบให้มีขนาดดังรูป

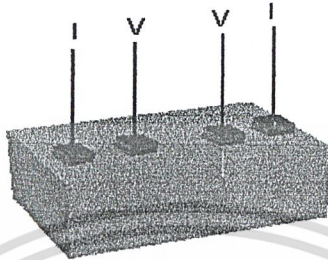


รูปที่ 3.10 แสดงชั้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ทำการตะไบตามขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

ทำการสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวเพื่อใช้ในการทดลอง มีตำแหน่งดังรูปที่ 3.11

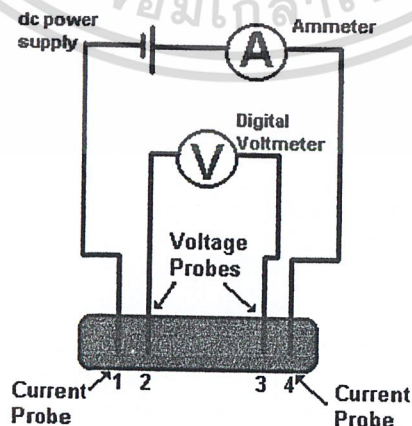


รูปที่ 3.11 แสดงจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

จากรูป การสร้างจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ในการบัดกรีต่อสายตัวนำเข้ากับตัวนำไฟฟ้าที่ยาว จะต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อให้รอยต่อเป็น โอห์มมิก โดยใช้ชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้าที่ยาวตามหัวข้อชุดบัดกรีต่อขั้วสายตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอุณหภูมิสูง

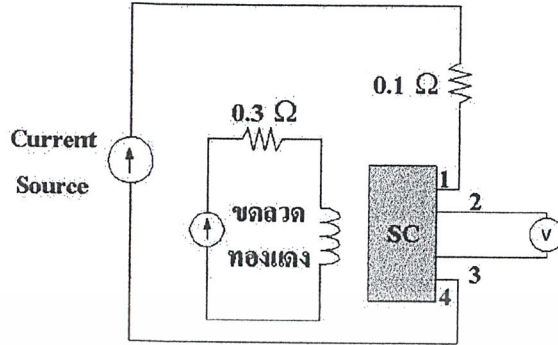
3.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

วงจรที่ใช้ในการทดลองหาค่ากระแสวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวแสดงดังรูปที่ 3.12 และวงจรที่ใช้ในการทดลองผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ดังรูปที่ 3.13 โดยจะทำการปรับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.12 แสดงรูปที่ใช้ในการทดลองหาค่ากระแสวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงรูปที่ใช้ในการทดลองผลกระทบความเข้มสนามแม่เหล็ก

3.5 ขั้นตอนในการทดลองที่ 1

ตอนที่ 1 การทดลองหาค่ากระแสแฉวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

- (1) ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.12
- (2) ป้อนกระแสให้แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด บันทึกค่าแรงดันที่ได้
- (3) ปรับกระแสให้มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากระแสแฉวิกฤต (กระแสที่ทำให้เกิดแรงดัน 20 mV)
- (4) นำค่าที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
- (5) ทำการทดลองตั้งแต่ข้อที่ (1) – (4) โดยทำการเปลี่ยนชิ้นสารที่ค่าแรงอัดจาก 0.4 ตัน เป็นค่าแรงอัด 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 ตัน ตามลำดับ

ตอนที่ 2 การทดลองหาค่าผลกระทบความเข้มของสนามแม่เหล็กต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

- (1) ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.13 โดยป้อนกระแสคงที่ให้มากกว่ากระแสแฉวิกฤตเล็กน้อย
- (2) นำชิ้นสารไปใส่ในชุดขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก
- (3) ทำการป้อนกระแสให้กับขดลวด โดยเริ่มตั้งแต่ 0 – 100 mA โดยปรับค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 mA
- (4) ทำการบันทึกค่าแรงดันที่ค่ากระแสต่างๆ
- (5) นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ป้อนให้ขดลวด (ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก) กับค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร

โดย แกน X คือ แรงดันตกคร่อมชิ้นสาร

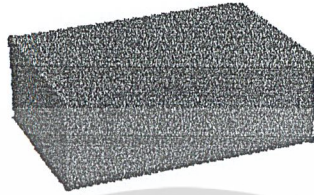
แกน Y คือ กระแสที่ป้อนให้กับขดลวดที่เปรียบเสมือนเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การประยุกต์ใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

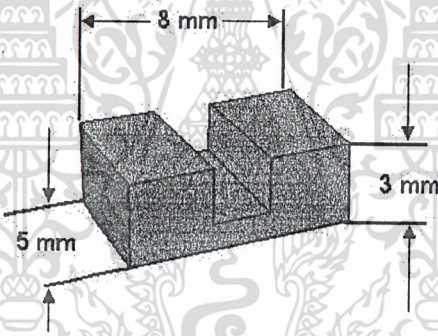
3.6.1 ขั้นตอนการลดค่ากระแสวิกฤติ

(1) บัดกรีสายตัวนำออกให้เหลือแต่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 3.14



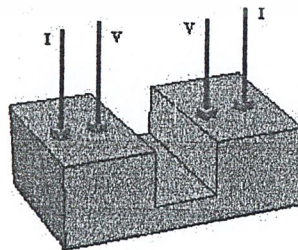
รูปที่ 3.14 แสดงชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

(2) ทำการตะไบชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้เป็นรูปตัวยู ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหลังการตะไบเป็นรูปตัวยู

(3) ทำการสร้างจุดสัมผัสของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ขั้นตอนในการทดลองที่ 2

ตอนที่ 1 การทดลองหาค่ากระแสวิกฤติของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหลังการตะไบ

- (1) ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.12
- (2) ป้อนกระแสให้แก่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด บันทึกค่าแรงดันที่ได้
- (3) ปรับกระแสให้มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่ากระแสวิกฤติ (กระแสที่ทำให้เกิดแรงดัน 20 mV)
- (4) นำค่าที่บันทึกได้พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ตอนที่ 2 การทดลองหาผลกระทบความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด หลังจากทำการลดค่ากระแสวิกฤติด้วยการตะไบ

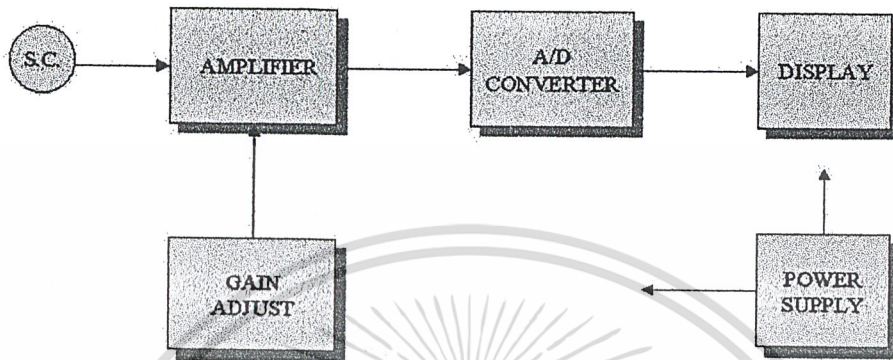
- (1) ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.13 โดยป้อนกระแสคงที่ให้มากกว่ากระแสวิกฤติเล็กน้อย
- (2) นำชิ้นสารไปใส่ในชุดขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก
- (3) ทำการป้อนกระแสให้กับขดลวด เริ่มตั้งแต่ 1 – 50 mA โดยปรับค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 1mA
- (4) ทำการบันทึกค่าแรงดันโดยใช้ Nanovolt Meter เป็นตัววัดแรงดันที่ค่ากระแสต่างๆ
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (3) และ (4) อีก 4 ครั้ง
- (6) นำค่าแรงดันที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ป้อนให้ขดลวดกับค่าแรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และระหว่างกระแสที่ป้อนให้ขดลวดกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตรวจวัดได้ (โดยกระแสที่ป้อนให้ขดลวด 1 mA จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเท่ากับ 165 mGAUSS)

โดย แกน X คือ แรงดันตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แกน Y คือ กระแสที่ป้อนให้ขดลวด

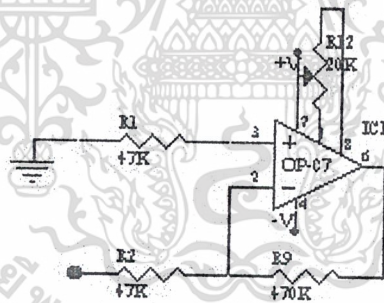
3.7 วงจรที่ใช้วัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

วงจรที่ใช้วัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจะแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 3.17 บล็อก ไดอะแกรมของวงจรวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1. ส่วนขยายสัญญาณและปรับแต่ง (Amplifier & Gain adjust)



รูปที่ 3.18 วงจร Inverting Amplifier

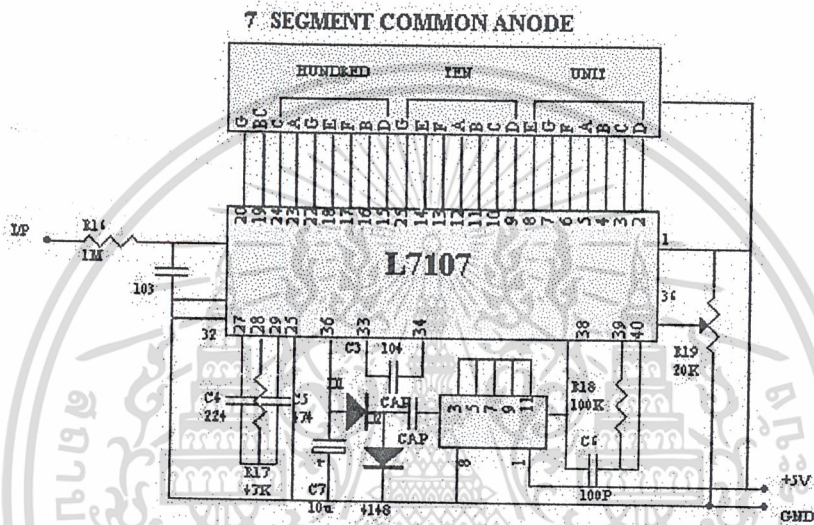
ส่วนขยายสัญญาณจะใช้ออปแอมป์ (เบอร์ OP-07) เป็นตัวขยายสัญญาณ โดยจัดวงจรเป็นแบบ Inverting Amplifier ต่อคาสโคดกัน 4 ภาค ซึ่งใน 2 ภาคแรกจะมีอัตราขยาย (GAIN) เท่ากับ 10 เท่า แต่ในภาคขยายสุดท้ายจะมีอัตราขยายปรับได้ออกมาจนถึง 100 เท่า ซึ่งการคิดค่าอัตราขยายของแต่ละภาคสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$A_V = - (R_f / R_{in})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลและแสดงผล (A/D Converter & Display)

ส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลจะใช้ IC เบอร์ L7107 และส่วนแสดงผลจะใช้ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันที่รับมาจากส่วนขยายสัญญาณและปรับแต่ง ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ที่ใช้งานในโครงการนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรส่วนแสดงผล

หัวใจหลักของวงจรนี้ คือ ไอซีเบอร์ L7107 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปในตระกูลซีมอส ทำงานได้โดยการต่ออุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติมเพียงไม่กี่ชิ้น

ไอซี L7107 จะทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตแบบอนาลอกเข้ามาที่ขา INPUT HI (31) และ INPUT LO (30) และจะไปเข้าวงจรขยายความแตกต่าง แรงดันที่อินพุตทั้งสองจะถูกหักล้างกัน แรงดันเอาต์พุตจากวงจรถ่ายความแตกต่างจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ซึ่งอยู่ภายในไอซี L7107 และนำมาเข้ารหัส BCD (Binary Code Decimal) ส่งผ่านวงจรแปลงเป็นแบบ 7 - Segment เพื่อให้ได้แรงดันไปขับ 7 - Segment ออกมาเป็นตัวเลขค่าที่ต้องการ

ขั้นตอนแรกในการสร้างดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ คือ ต้องกำหนดขั้ววัดสูงสุดก่อน โดยค่าแรงดันไฟอินพุตสูงสุดที่จะวัดได้นั้น จะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของแรงดันอ้างอิงที่ขา REF HI (36)

2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรและการออกแบบ

2.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock Generator)

สำหรับวงจรดิจิทัลโวลท์มิเตอร์ใช้สัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 48 กิโลเฮิร์ต โดยวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น นำสัญญาณจากวงจรกำเนิดความถี่จากภายนอกมาต่อเข้าที่ขา 40 โดยตรง หรืออาจใช้คริสตัลต่อระหว่างขา 39 และ 40 โดยวิธีที่ง่ายที่สุด คือ ใช้วงจร R-C ออสซิลเลเตอร์ ต่อที่ขา 38, 39 และ 40 โดยค่าความถี่ที่กำหนดได้จากสมการ

$$F_{osc} = 0.45/R.C$$

เมื่อต้องการความถี่ 48 kHz และกำหนดค่า C เท่ากับ 100 pF จะได้ค่า R เท่ากับ

$$\begin{aligned} R &= 0.45/(C.F_{osc}) \\ &= 0.45/(100 \times 10^{-2} \times 48000) \\ &= 9375 \times 10^3 \\ &\approx 100 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

2.1.2 อินทิเกรตติงรีซิสเตอร์ (Integrating Resistor)

เป็นตัวต้านทานที่ต่ออยู่ที่ขา 28 ใช้ค่า 47 k Ω

2.1.3 เรฟเฟอเรนซ์คาปาซิเตอร์ (Reference Capacitor)

เป็นคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ระหว่างขา 33 และ 34 ใช้ค่า 0.1 μF

2.1.4 อินทิเกรตติงคาปาซิเตอร์ (Integrating Capacitor)

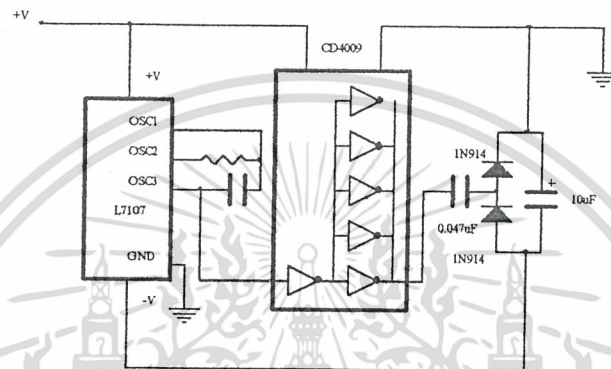
เป็นคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ที่ขา 27 ใช้ค่า 0.22 μF

2.1.5 ออโตซีโรคาปาซิเตอร์ (Autozero Capacitor)

เป็นคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ที่ขา 29 ทำหน้าที่ให้วงจรแสดงผลเป็นศูนย์ ในขณะที่ไม่มีสัญญาณอินพุท ใช้ค่า 0.047 μF

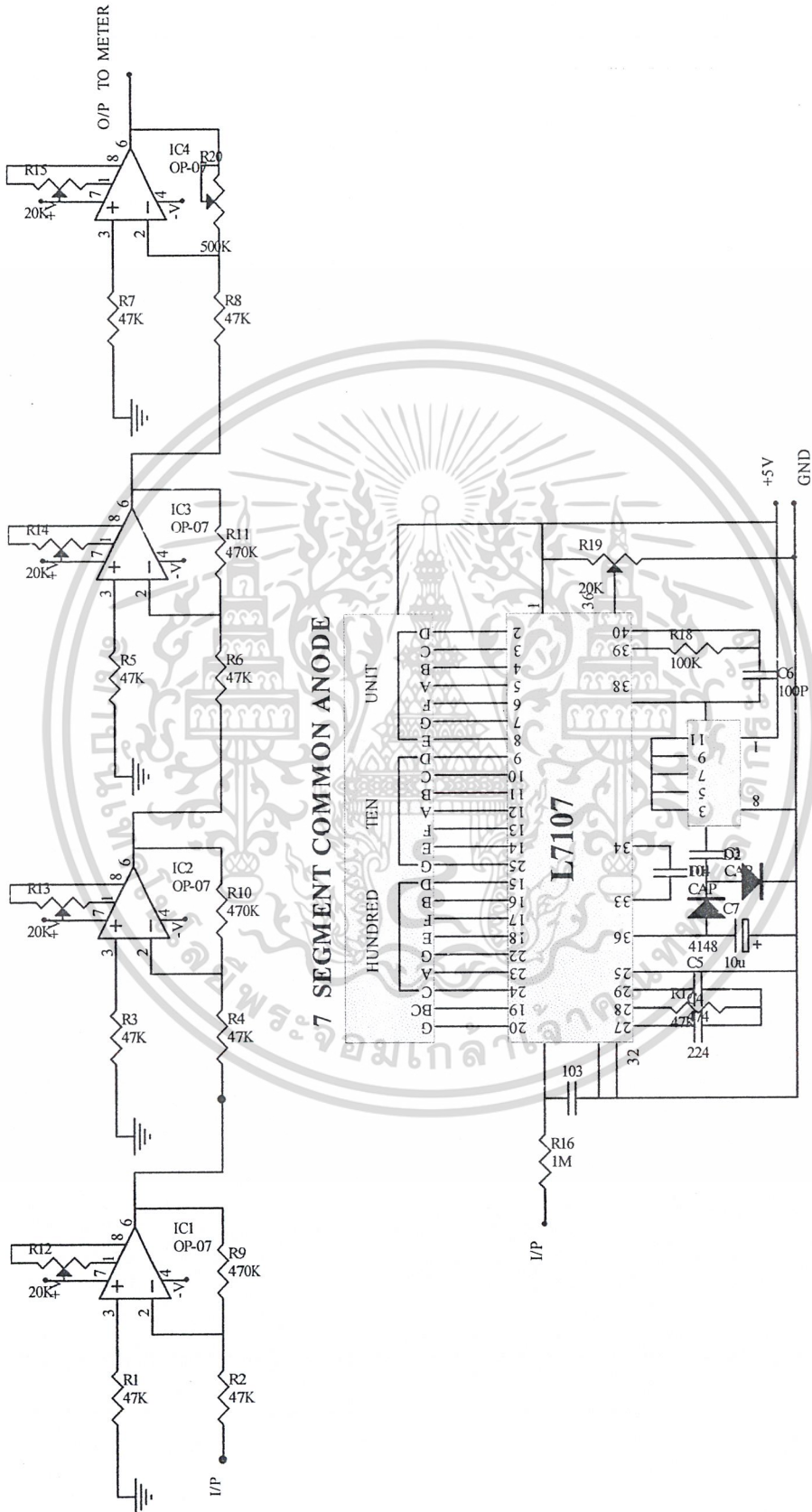
2.1.6 แหล่งจ่ายไฟลบ (Negative Supply)

โดยปกติวงจรดิจิทัลลอจิกใช้ไฟเลี้ยงที่ประกอบด้วย ไฟบวก , ลบ และกราวด์ แต่เพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงใช้เพียงไฟบวกและกราวด์จากแหล่งจ่ายภายนอก แล้วสร้างไฟลบขึ้นใหม่ โดยนำสัญญาณนาฬิกาจากขา 38 ของไอซี L7107 มาผ่านวงจรดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรสร้างไฟลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรรวมเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจร

เมื่อจ่ายกระแสให้กับเซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจนกระทั่งมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤติของเซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเพียงเล็กน้อย แล้วนำไปทำการตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก จะทำให้ได้สัญญาณแรงดันกระแสตรง (DC) ออกมาเป็นค่าต่างๆในระดับมิลลิโวลต์ ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวนี้จะแปรค่าตามความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันตกคร่อมเซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงค่าแรงดันตกคร่อมเซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะลดลงตามไปด้วย เรานำค่าแรงดันระดับมิลลิโวลต์ที่ได้ไปทำการขยายด้วยส่วนขยายสัญญาณซึ่งมีอัตราขยายสัญญาณโดยรวม $10^3 - 10^5$ เท่า เมื่อทำการสัญญาณขยายเรียบร้อยแล้ว สัญญาณก็จะถูกนำไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ A/D Converter ไอซีเบอร์ L7107 ซึ่งเป็นไอซีสำเร็จรูปสามารถใช้งานร่วมกับ Display ที่เป็น 7 – Segment ในที่นี้มี $3 \frac{1}{2}$ หลัก ได้เลย

3.7.1 ขั้นตอนในการทดลองที่ 3

การทดลองหาผลกระทบความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด หลังจากทำการลดค่ากระแสวิกฤติด้วยการตะไบ โดยใช้วงจรที่สร้างขึ้น

- (1) ทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.13 โดยป้อนกระแสคงที่ให้มากกว่ากระแสวิกฤติเล็กน้อย
- (2) นำเซ็นเซอร์ไปใส่ในชุดขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก
- (3) ทำการป้อนกระแสให้กับขดลวด เริ่มตั้งแต่ 1 – 50 mA โดยปรับค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 1mA
- (4) ทำการบันทึกค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วงจรที่สร้างขึ้นเป็นตัววัด ที่ค่ากระแสต่างๆ
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (3) และ (4) อีก 4 ครั้ง
- (6) นำค่าแรงดันที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ป้อนให้ขดลวดกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้

โดย แกน X คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

แกน Y คือ กระแสที่ป้อนให้ขดลวด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

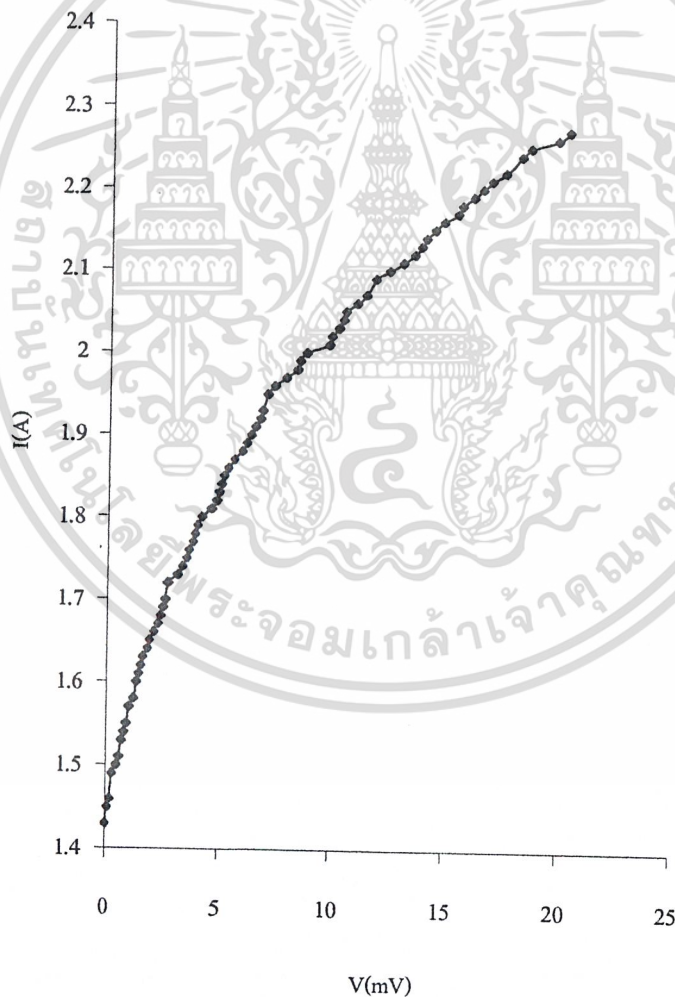
4.1 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ผลการทดลองที่ 1

ตอนที่ 1

4.1.1 เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงแรงอัดของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าต่าง ๆ

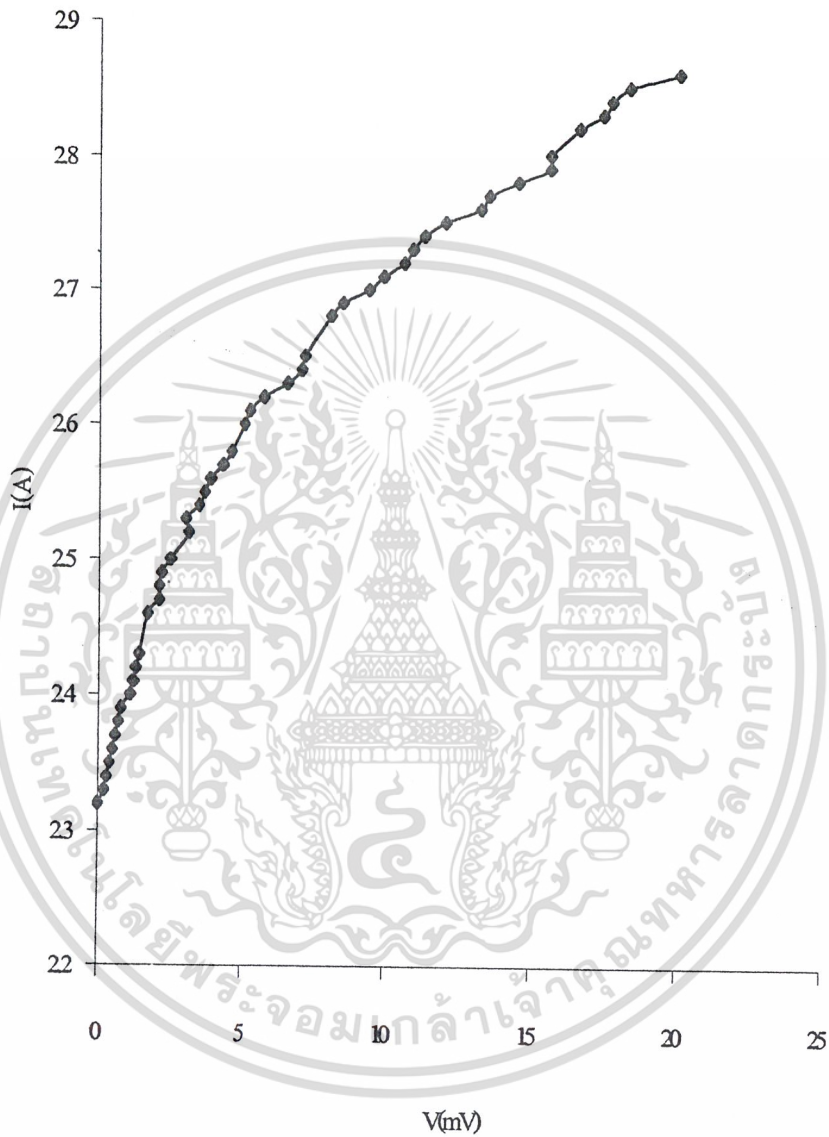
(1) เมื่อชิ้นสารมีแรงอัด 0.4 ตัน



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อชิ้นสารมีแรงอัด 0.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

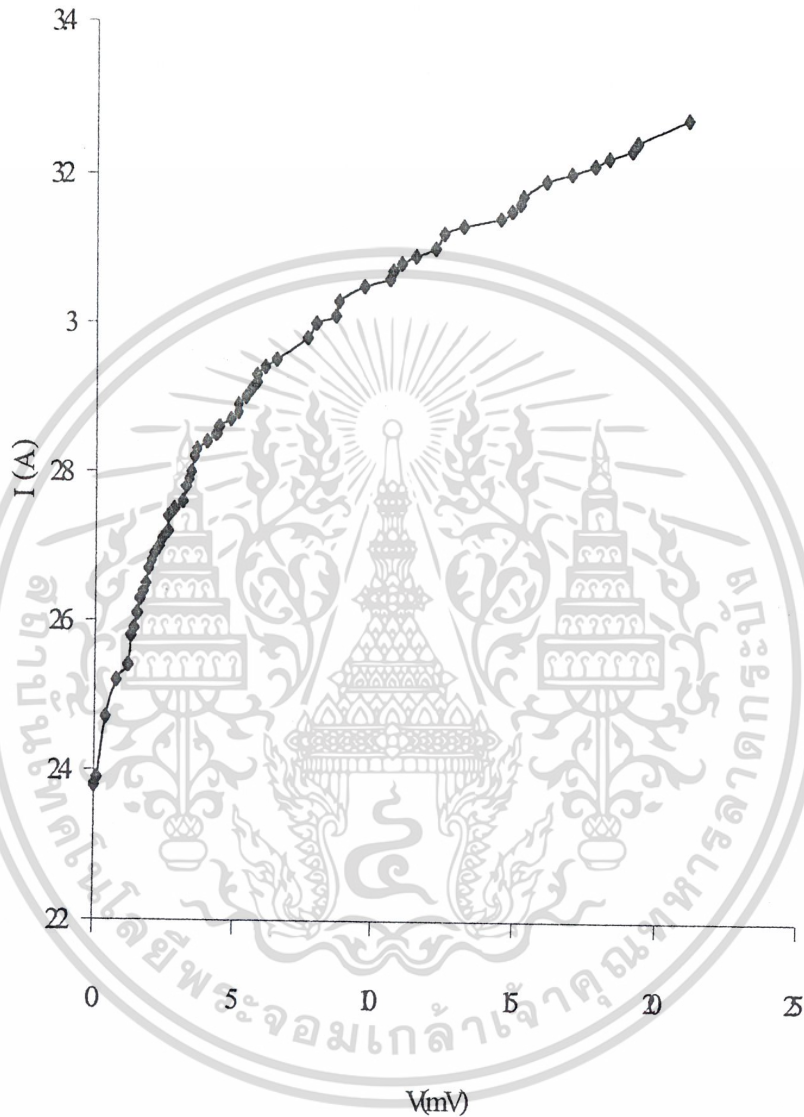
(2) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ตัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

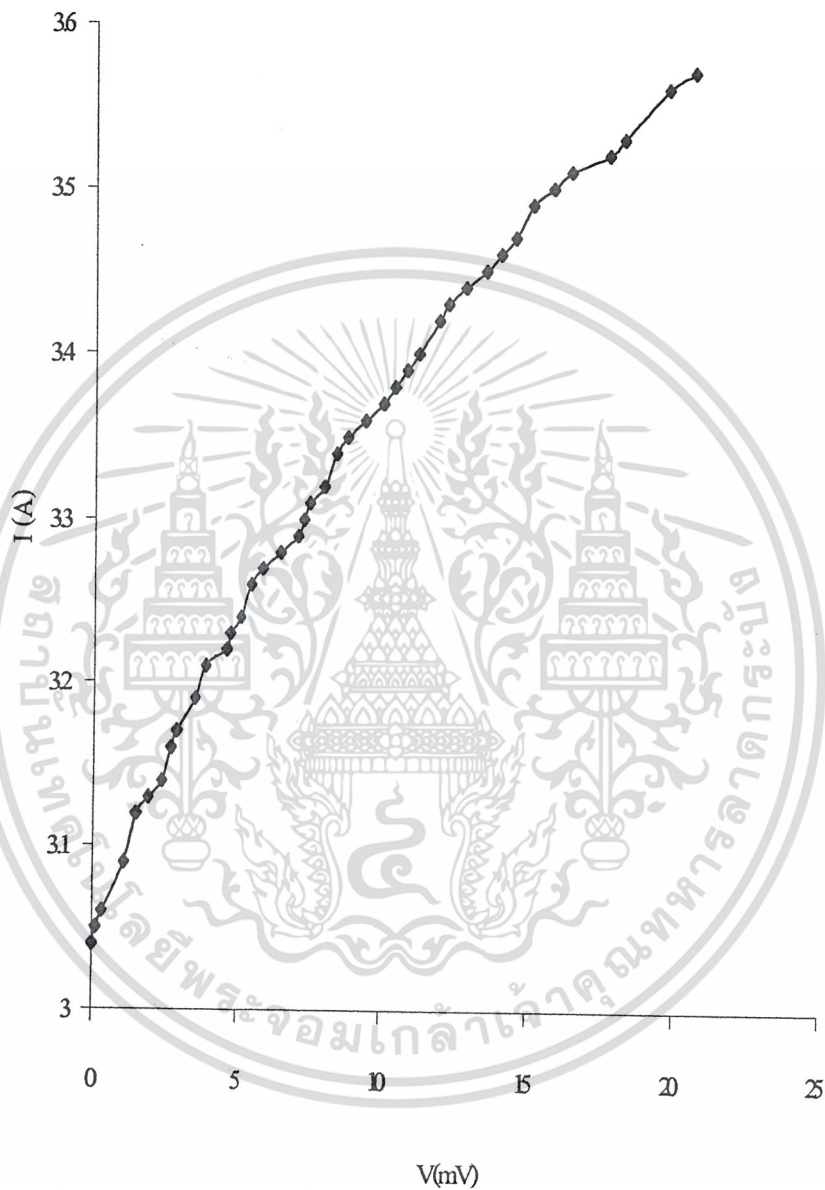
(3) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ตัน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

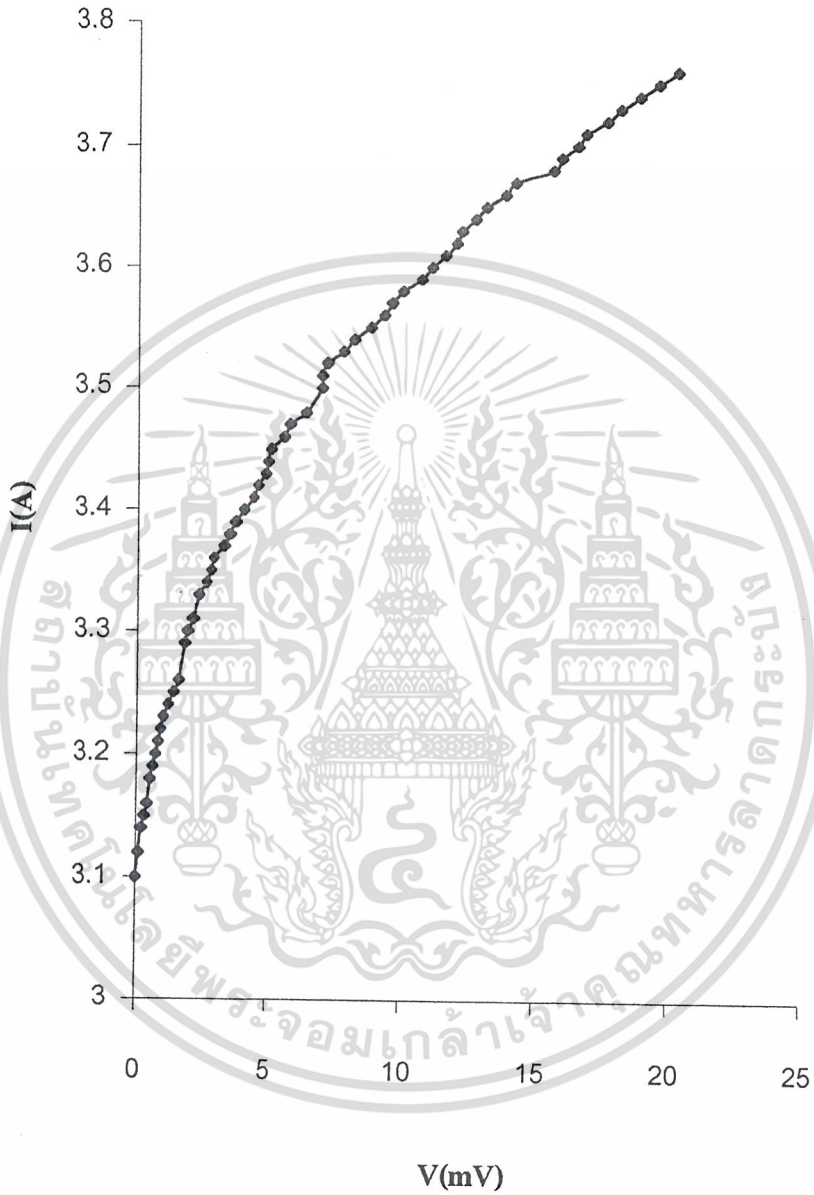
(4) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ตัน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

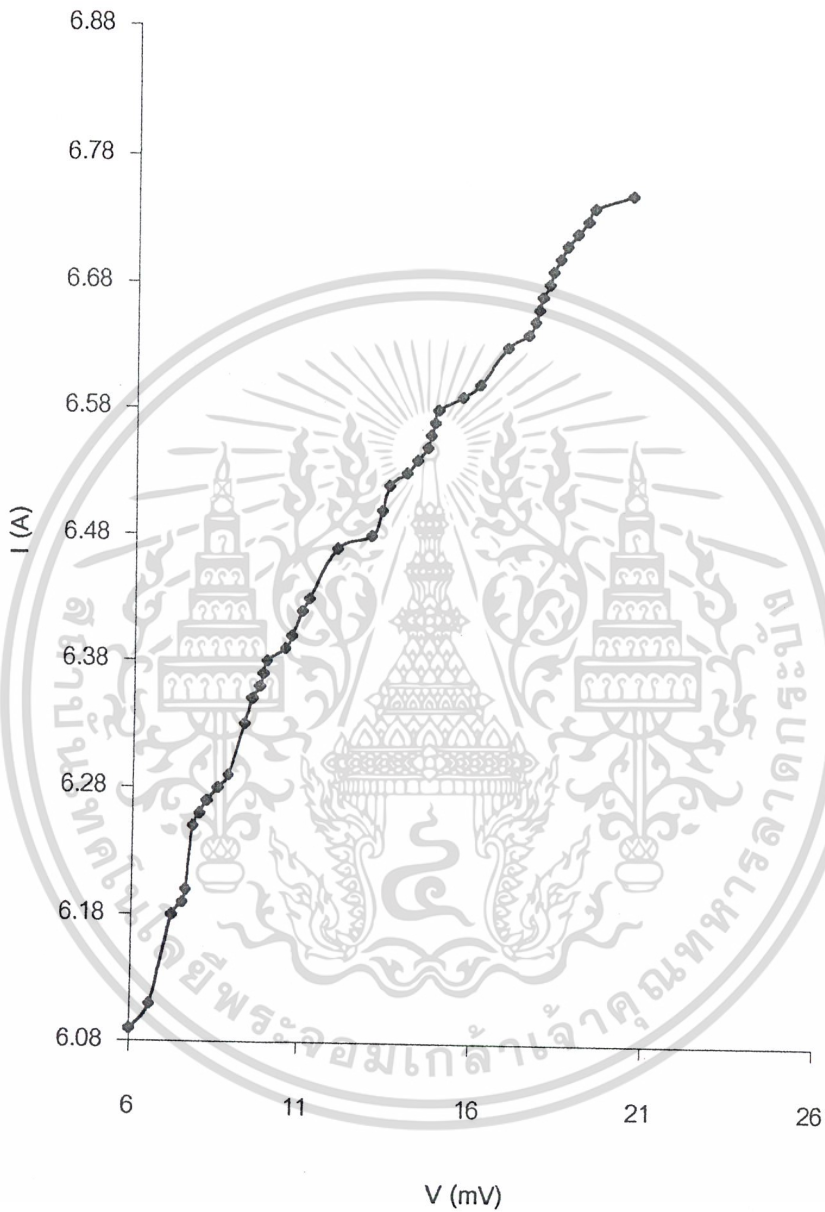
(5) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ตัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ตัน



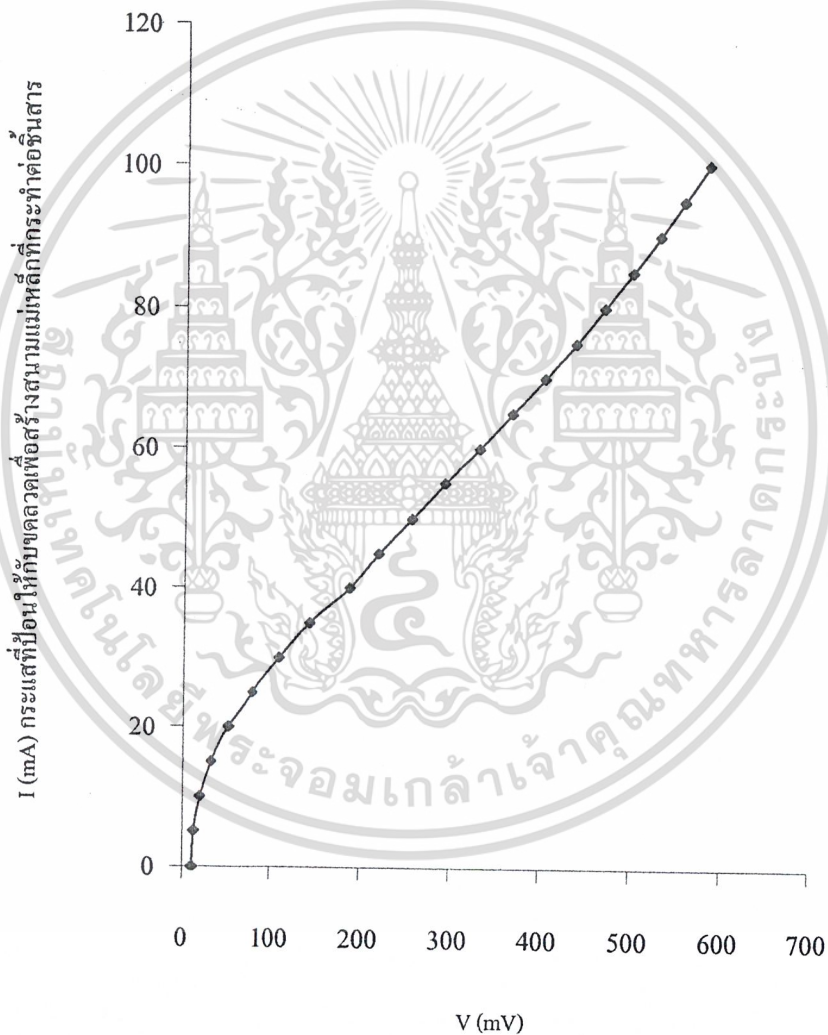
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2

4.1.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงแรงอัดของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

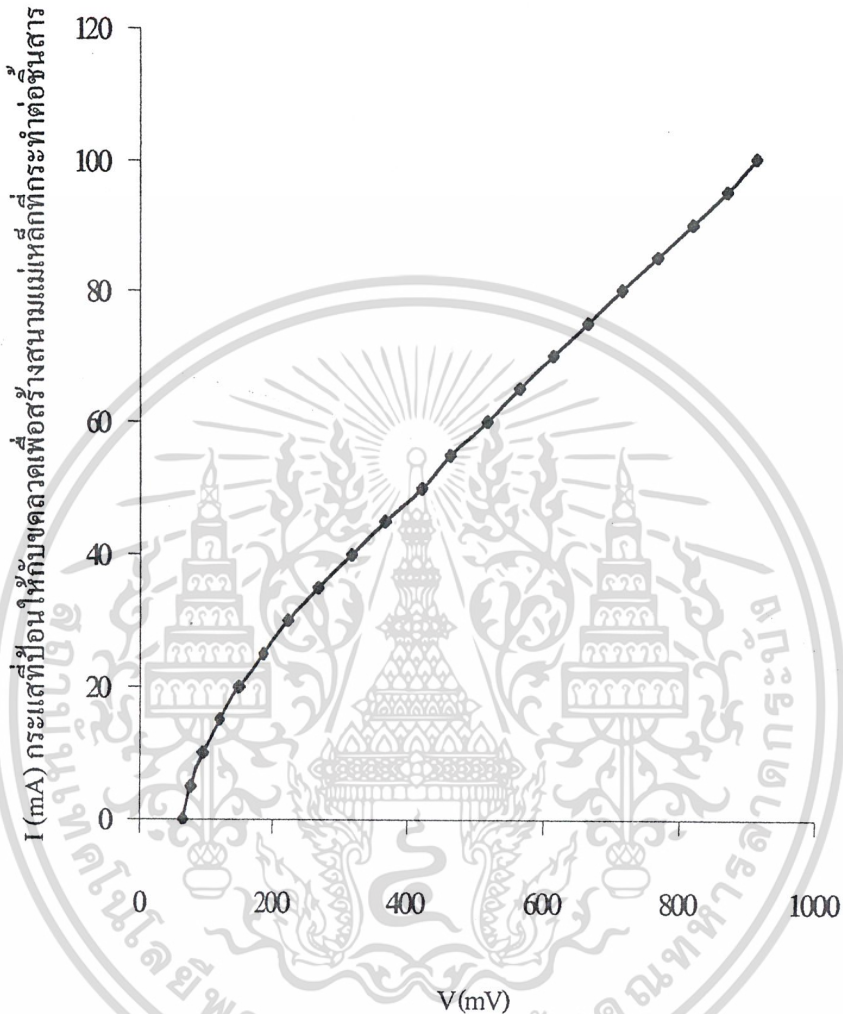
(1) เมื่อชิ้นสารมีแรงอัด 0.4 ตัน (จ่ายกระแสคงที่ 1.48 A)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อชิ้นสารมีแรงอัด 0.4 ตัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

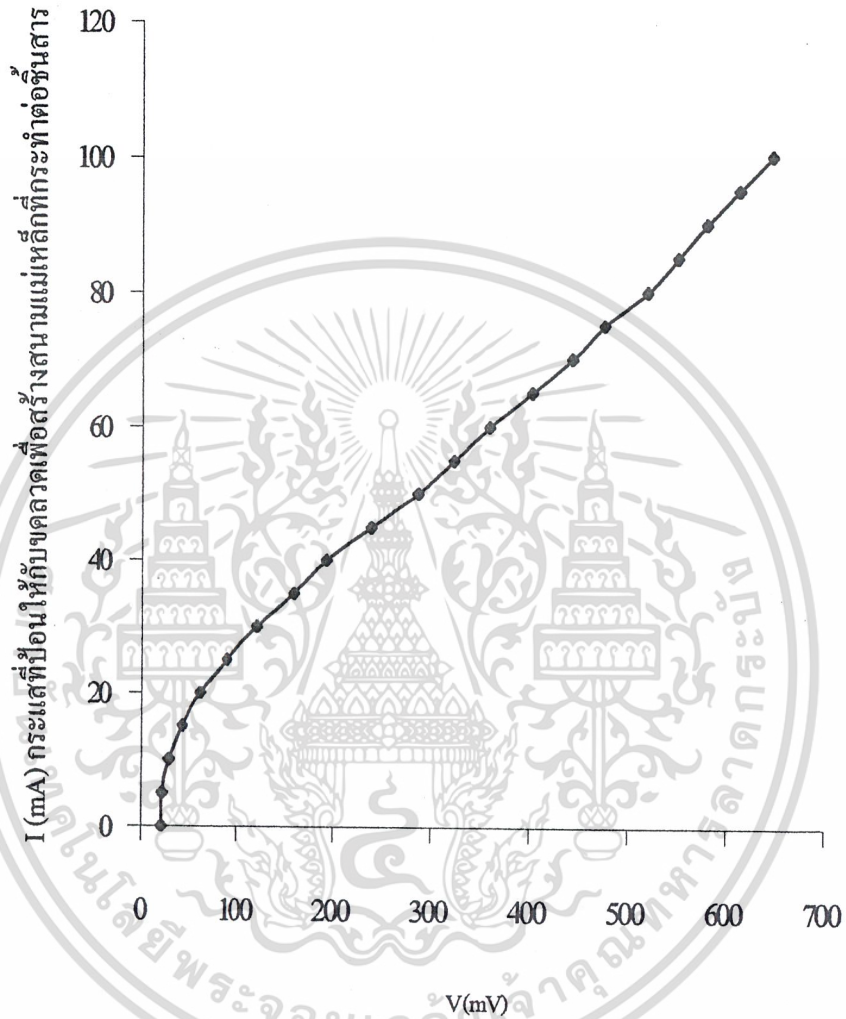
(2) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ตัน(จ่ายกระแสคงที่ 2.41 A)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.6 ตัน เมื่อมี
สนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

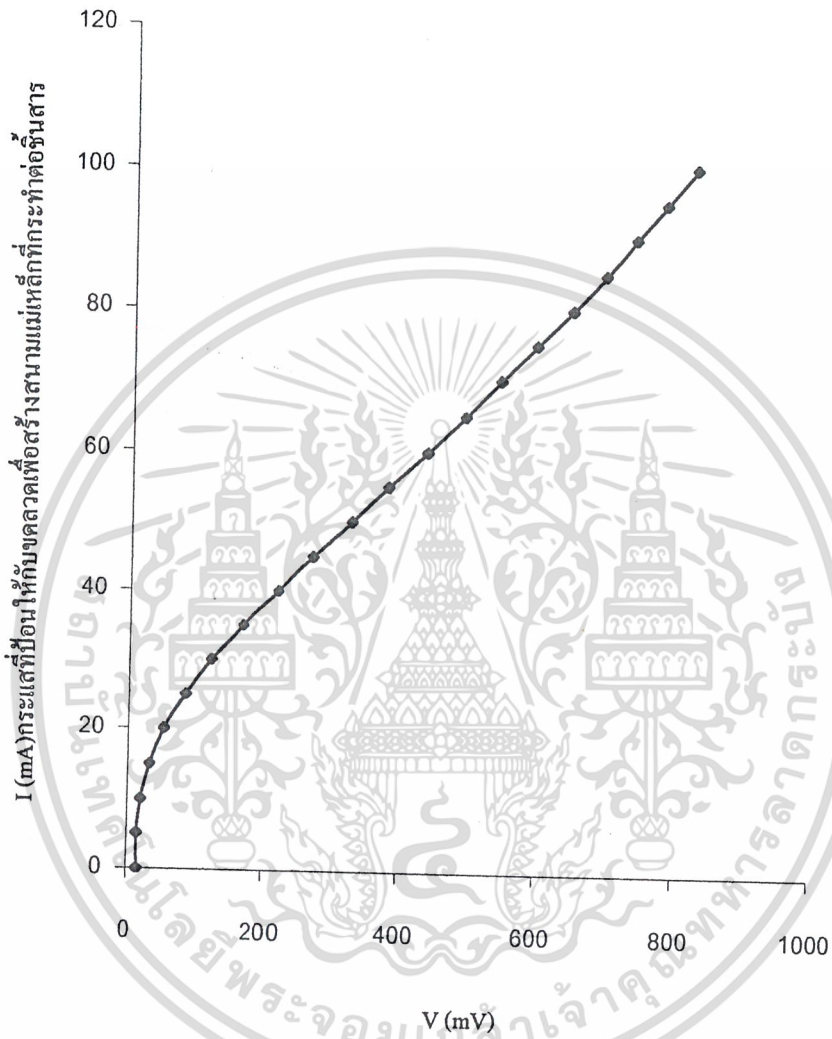
(3) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ตัน (จ่ายกระแสคงที่ 2.47 A)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 0.8 ตัน เมื่อมี
สนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

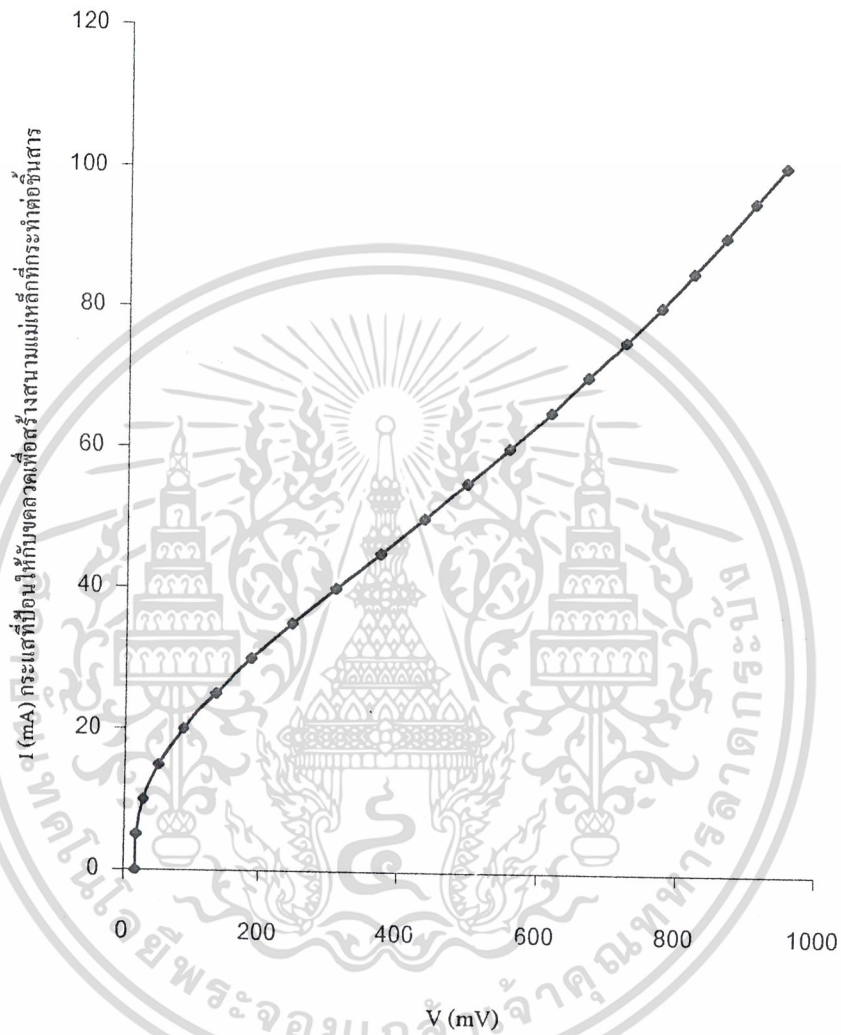
(4) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ตัน(จ่ายกระแสคงที่ 3.16 A)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.0 ตัน เมื่อมี
สนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

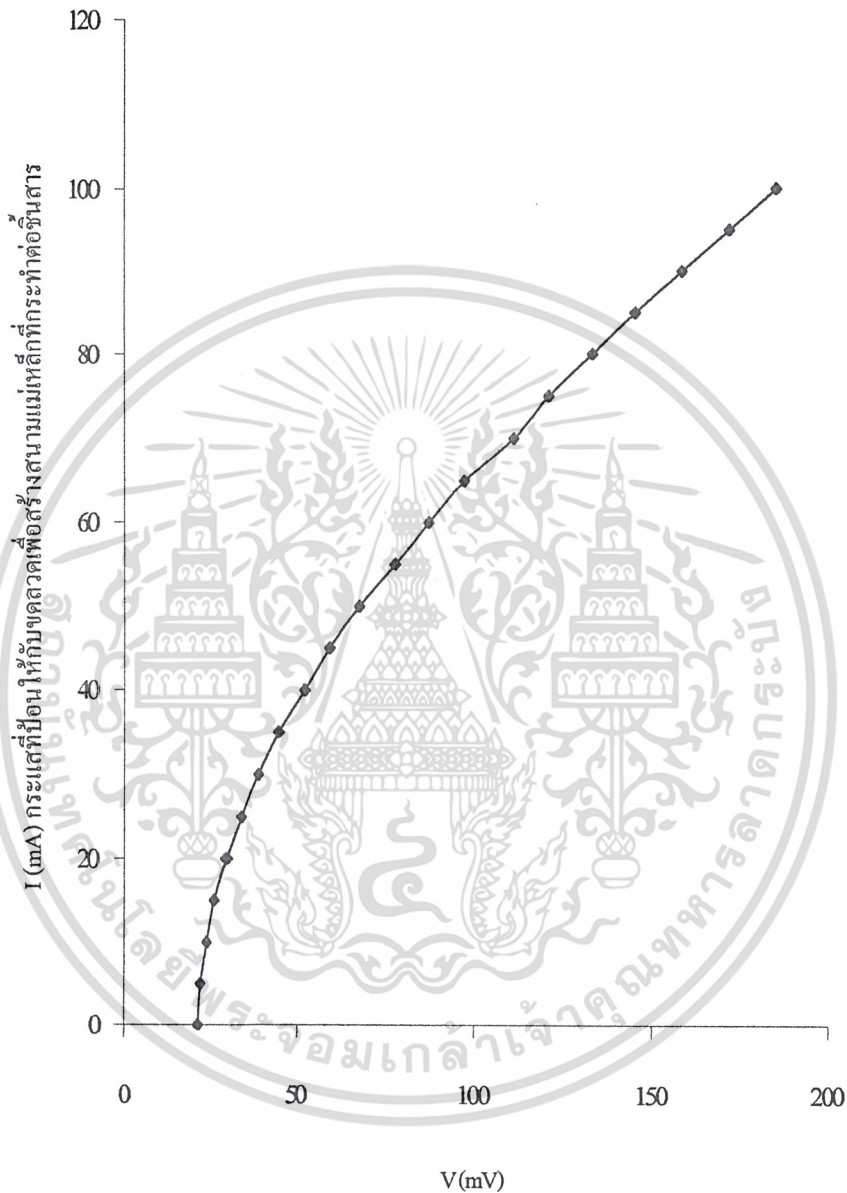
(5) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ตัน(จ่ายกระแสคงที่ 3.22 A)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.2 ตัน เมื่อมี
สนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) เมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ตัน(จ่ายกระแสคงที่ 6.33 A)

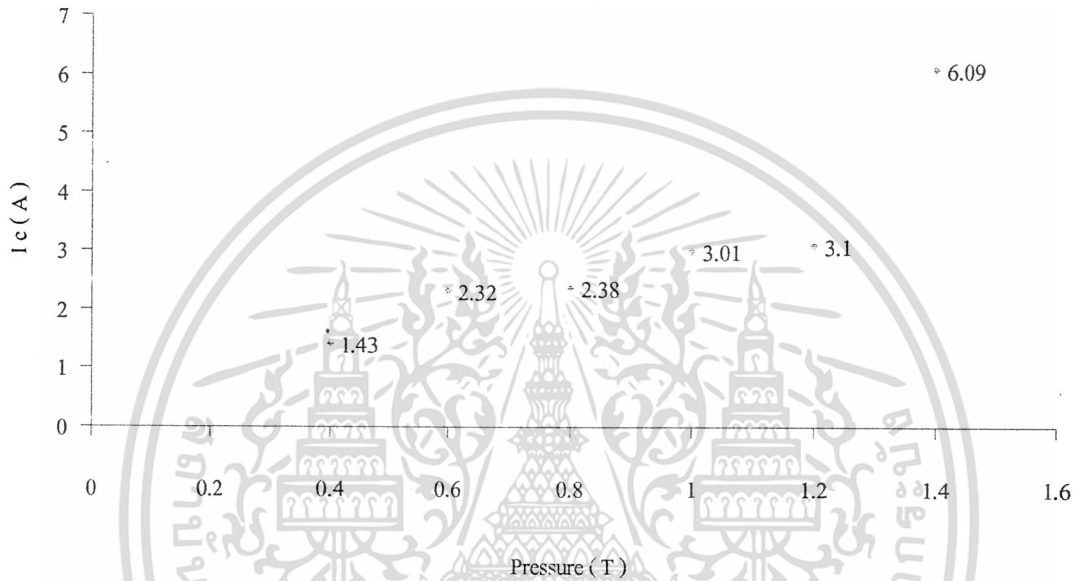


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อขึ้นสารมีแรงอัด 1.4 ตัน เมื่อมี
สนามแม่เหล็กภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

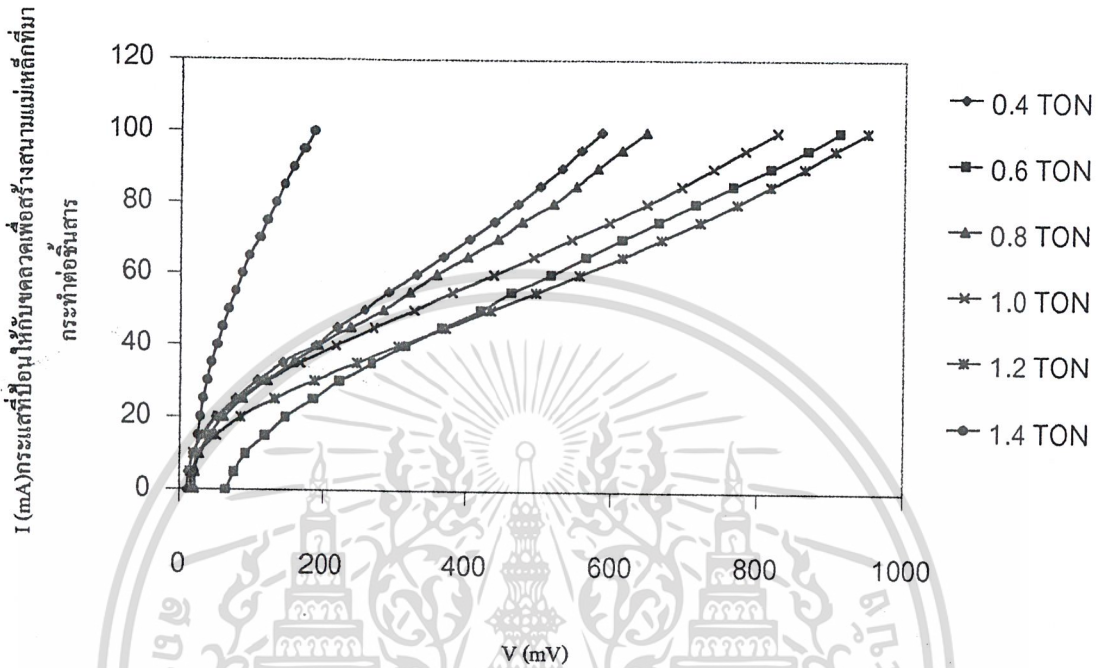
4.2 ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสวิกฤตกับค่าแรงอัดของซินสารต่าง ๆ กัน

(1) เมื่อ ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสวิกฤตกับค่าแรงอัดของซินสารต่าง ๆ กัน
เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

(2) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมขั้วอินสาร กับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำ

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับแรงดันที่ได้ เมื่อพิจารณาขั้วอินสารที่แรงอัด 0.4 ตัน จะมีค่ากระแสแฉีกจุดต่ำที่สุดคือ 1.43 แอมแปร์และสูงสุด 6.09 แอมแปร์ที่แรงอัด 1.4 ตัน

เมื่อทำการทดลองผลของสนามแม่เหล็กกับขั้วอินสารเมื่อให้กระแสคงที่ จะพบว่าแรงดันตกคร่อมขั้วอินสารเพิ่มขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำต่อขั้วอินสารมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กจะไปทำให้ขั้วอินสารเสถียรภาพของความนำไฟฟ้าที่ยังยวดยิ่งหรือมีความต้านทานเพิ่มขึ้น

4.4 แนวทางการประยุกต์ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

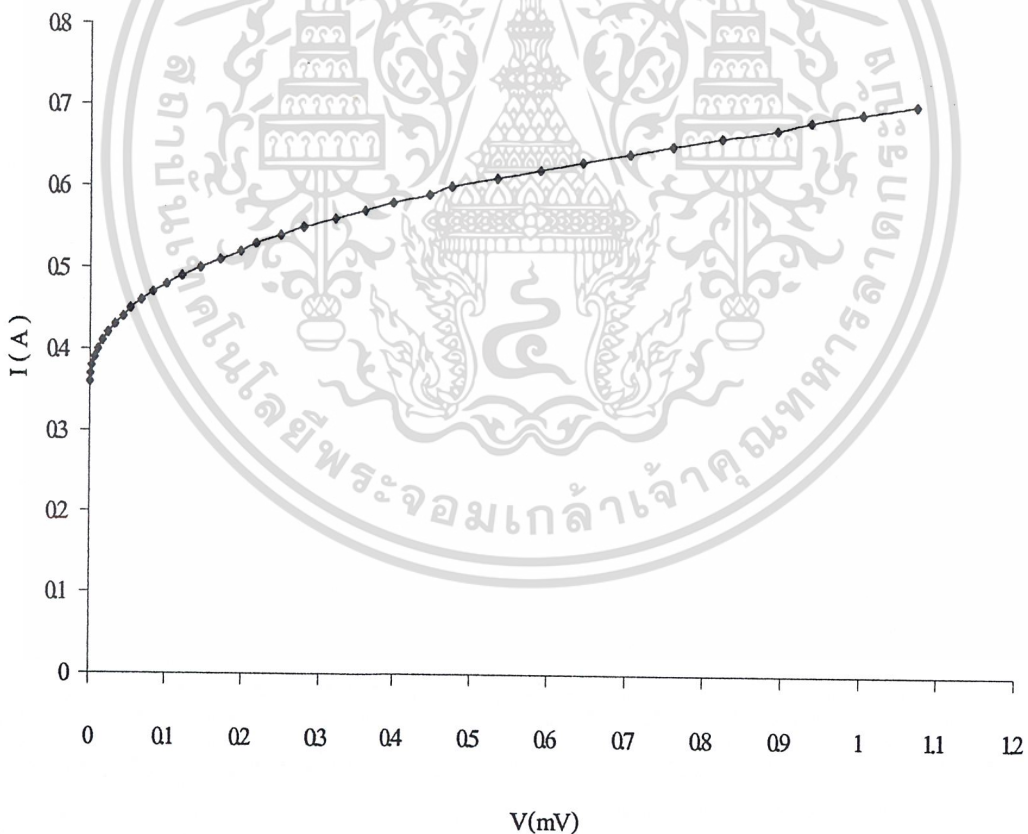
ในการนำไปประยุกต์ใช้งานขั้นต่อไปเราจะนำชิ้นสารที่มีการเสถียรภาพความนำได้ง่ายที่สุดเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำ โดยจะต้องนำชิ้นสารไปเข้าสู่กระบวนการลดกระแสวิกฤต โดยการตะไบ แล้วนำไปใช้งานร่วมกับวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อแสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเป็นค่าที่สามารถอ่านได้

4.5 การทดลองประยุกต์ใช้งานชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

ผลการทดลองที่ 2

ตอนที่ 1

4.5.1 ผลการทดลองลดกระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยการตะไบ



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร

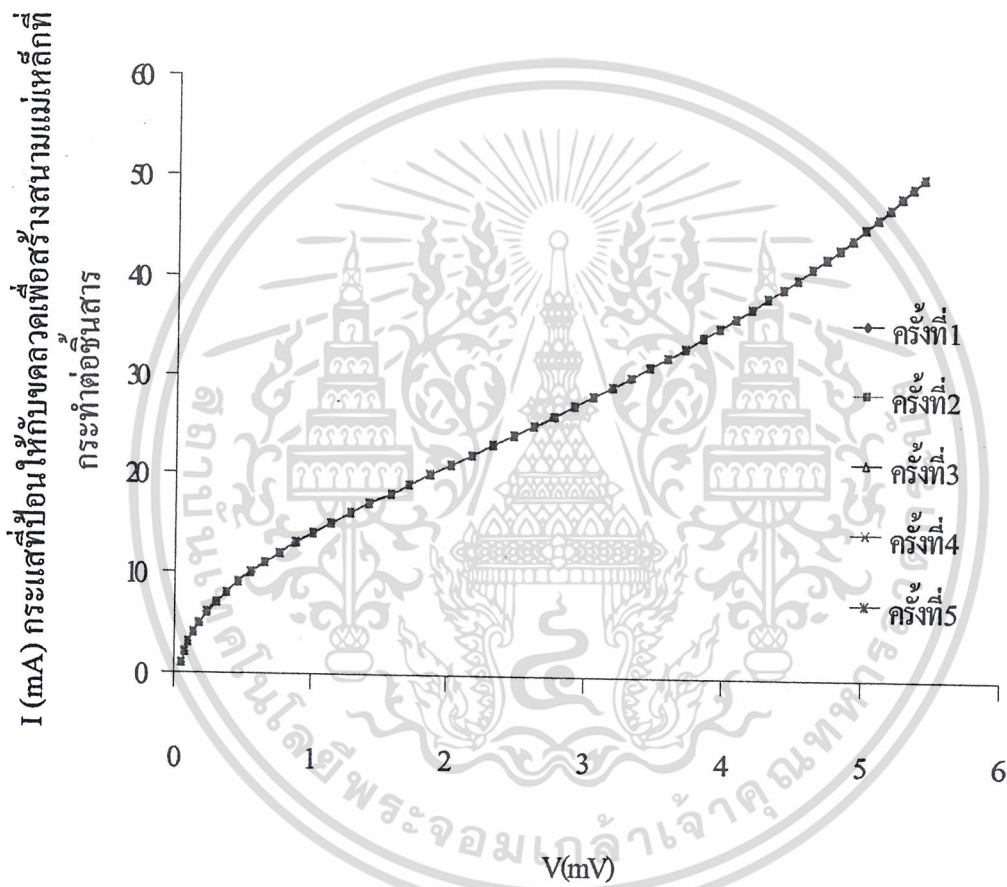
หลังการตะไบของชิ้นสารที่มีแรงอัด 1 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2

4.5.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวด เมื่อนำไปตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

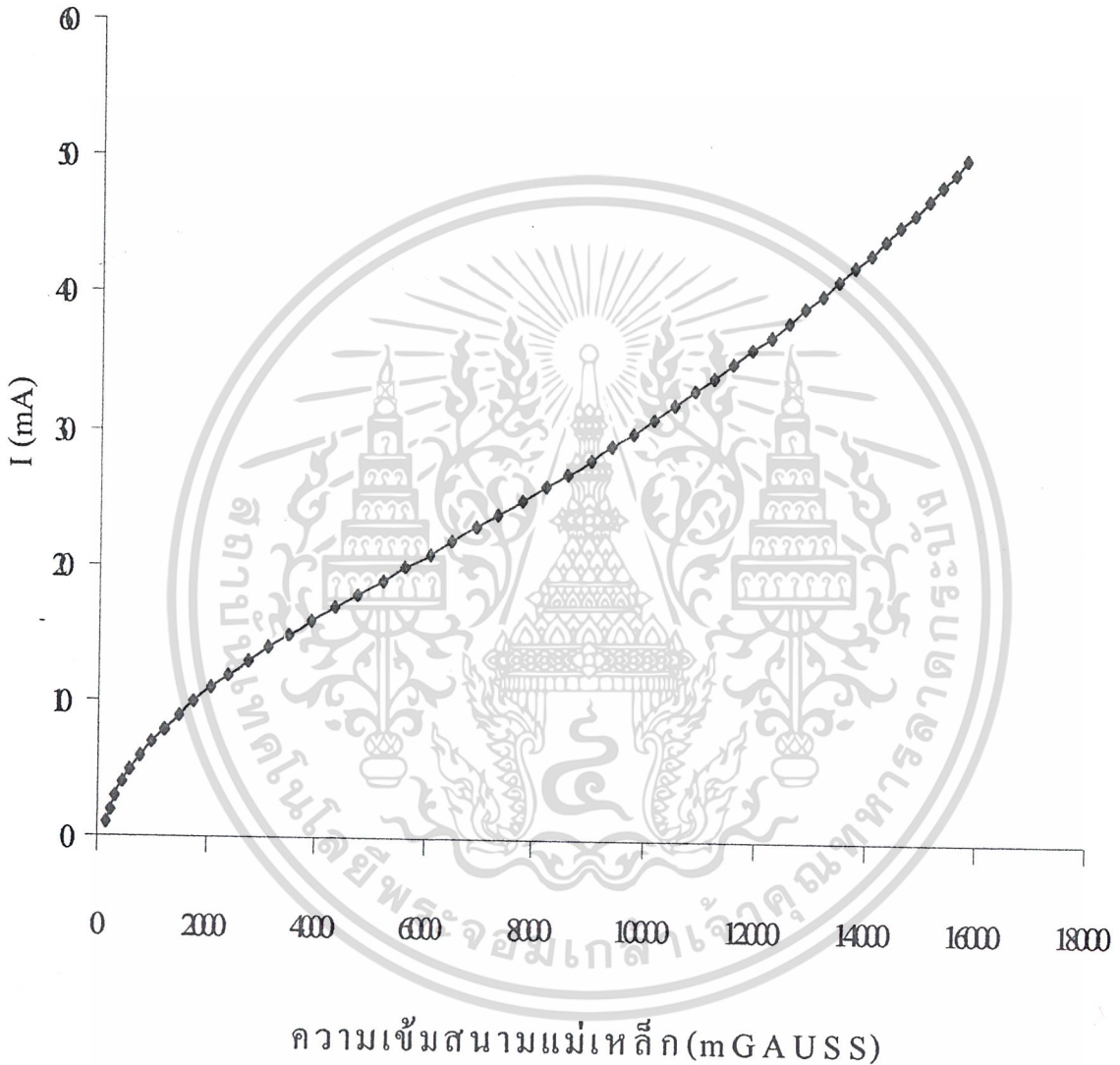
- (1) เมื่อใช้ Nano Meter วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อแสดงเสถียรของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวด



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่มีแรงอัด 1 ตัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

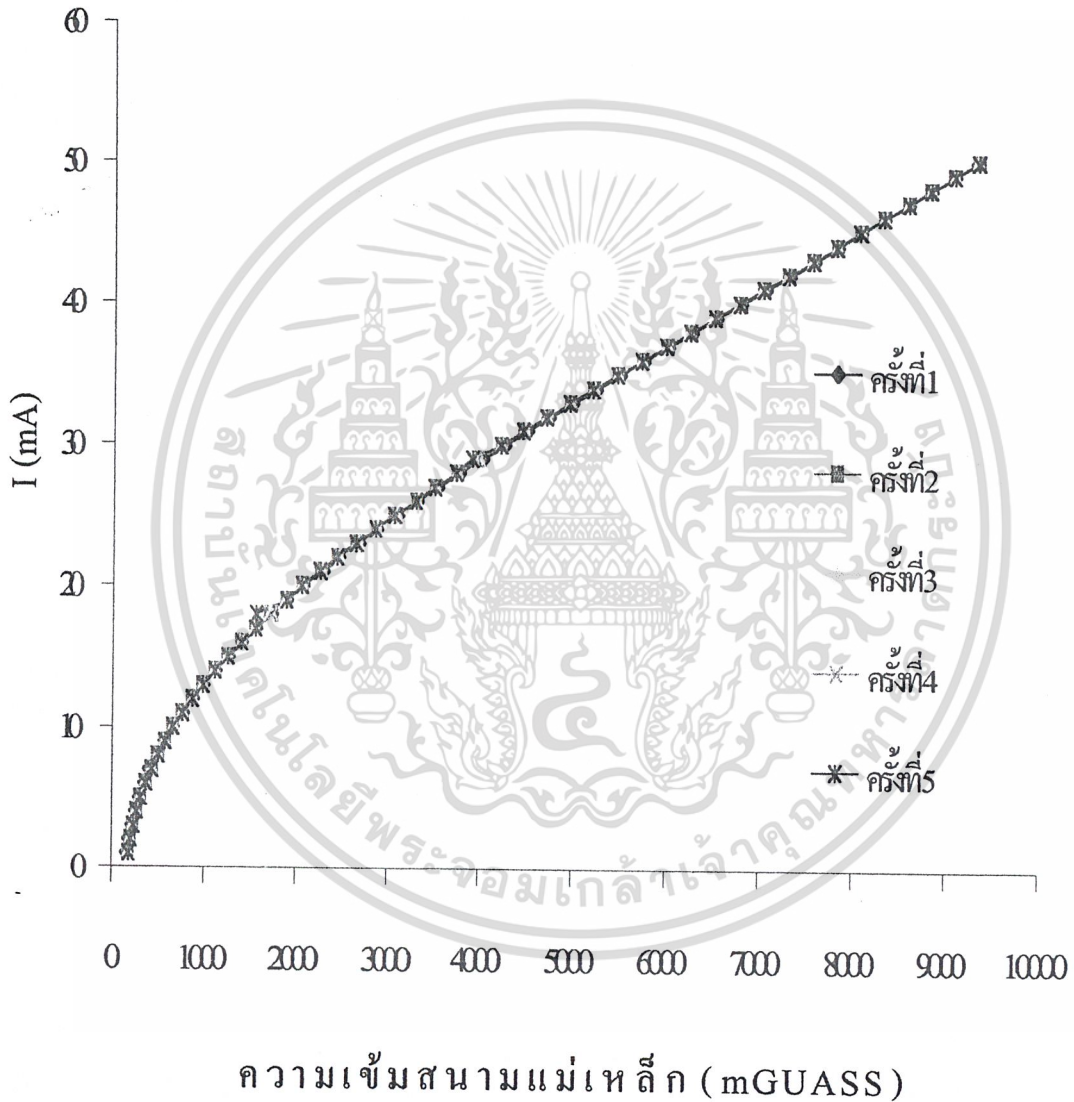
(2) เมื่อพิจารณาในรูปของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



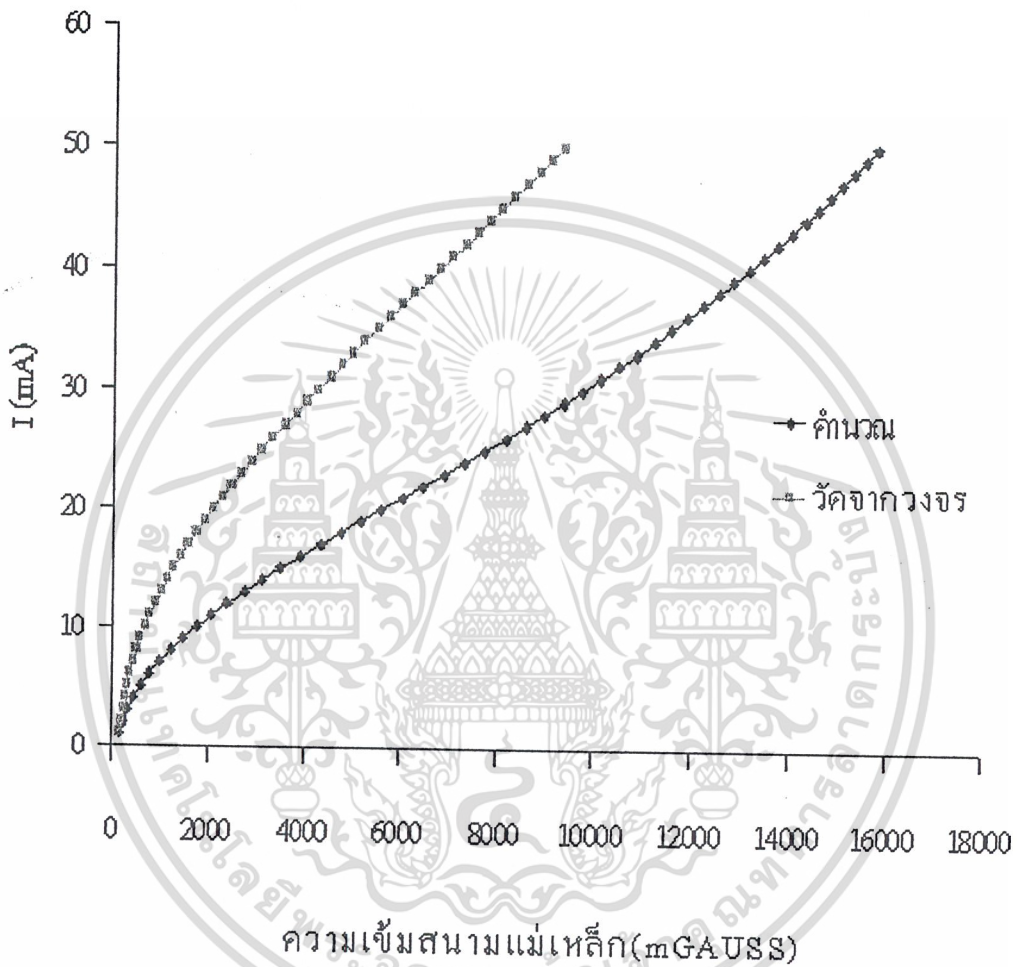
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มของสนามแม่เหล็กจากการคำนวณโดยใช้เส้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวคที่มีแรงอัด 1 ตัน เป็นตัวตรวจวัด

ผลการทดลองที่ 3

4.5.3 ผลการทดลองหาผลกระทบความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด หลังจากทำการลดค่ากระแสวิกฤตด้วยการตะไบ โดยใช้วงจรที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดที่มีแรงอัด 1 ตันวัดได้โดยใช้วงจรที่สร้าง



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากการคำนวณกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดจากวงจรที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและวิจารณ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ผลของแรงยึดต่อชั้นสารในกระบวนการสร้างที่มีผลต่อกระแสวิกฤตผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ผลของการตะไบและรูปร่างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีผลต่อกระแสวิกฤต และการนำไปใช้งานเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก

จากการศึกษา จะได้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่จะนำมาสร้างเป็นหัววัดสนามแม่เหล็ก ที่แรงอัด 1.0 ตัน และนำมาลดกระแสวิกฤตด้วยการตะไบเป็นรูปตัวยู จะได้ค่ากระแสวิกฤตลดลงเหลือ 390 mA และยังจะทำให้มีความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กดีขึ้น แล้วจึงนำมาใช้งานร่วมกับวงจรที่ออกแบบ โดยจะทดลองตรวจจับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนกระแสให้กับขดลวด ซึ่งจากการทดลองได้ทำการป้อนกระแสให้กับขดลวดตั้งแต่ 1mA ถึง 50 mA พบว่าวงจรสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้อยู่ภายในช่วงประมาณ 165 mGAUSS ถึง 9230 mGAUSS และทำการทดลองซ้ำอีก 4 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของวงจรอยู่ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณก็จะพบว่าสนามแม่เหล็กที่วัดจากวงจรก็จะมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ถ้ามีการศึกษาและออกแบบวงจรที่มีความละเอียดมากกว่าก็จะทำให้ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับการคำนวณมากขึ้น ซึ่งก็จะเป็นการศึกษาและพัฒนาในแนวกว้างต่อไป

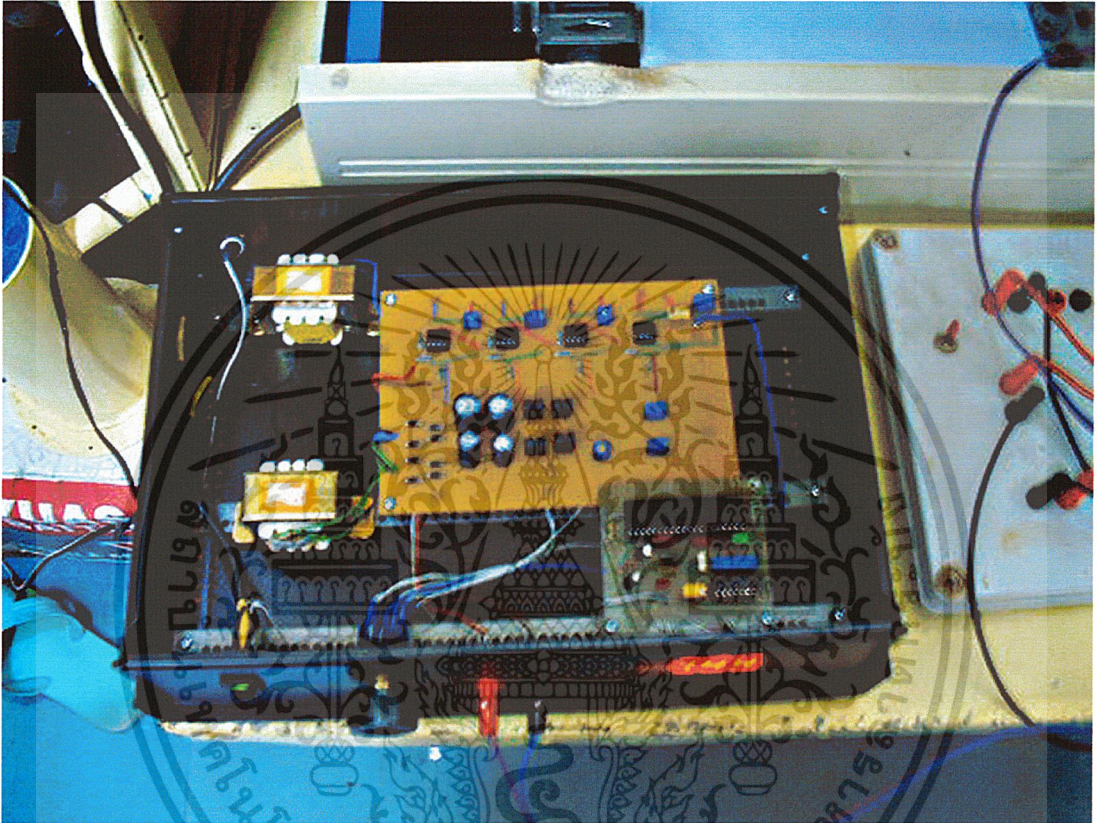


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเทียบเกาส์

$$1 \text{ mA} = 165 \text{ mGAUSS}$$

$$n \text{ mA} = n \times 165 \text{ mGAUSS}$$

I (A)	Iref (GUASS)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
1.00E-03	1.65E-01	1.65E-04
2.00E-03	1.65E-01	3.30E-04
3.00E-03	1.65E-01	4.95E-04
4.00E-03	1.65E-01	6.60E-04
5.00E-03	1.65E-01	8.25E-04
6.00E-03	1.65E-01	9.90E-04
7.00E-03	1.65E-01	1.16E-03
8.00E-03	1.65E-01	1.32E-03
9.00E-03	1.65E-01	1.49E-03
1.00E-02	1.65E-01	1.65E-03
1.10E-02	1.65E-01	1.82E-03
1.20E-02	1.65E-01	1.98E-03
1.30E-02	1.65E-01	2.15E-03
1.40E-02	1.65E-01	2.31E-03
1.50E-02	1.65E-01	2.48E-03
1.60E-02	1.65E-01	2.64E-03
1.70E-02	1.65E-01	2.81E-03
1.80E-02	1.65E-01	2.97E-03
1.90E-02	1.65E-01	3.14E-03
2.00E-02	1.65E-01	3.30E-03
2.10E-02	1.65E-01	3.47E-03
2.20E-02	1.65E-01	3.63E-03
2.30E-02	1.65E-01	3.80E-03
2.40E-02	1.65E-01	3.96E-03
2.50E-02	1.65E-01	4.13E-03

I (A)	Iref (GUASS)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
2.60E-02	1.65E-01	4.29E-03
2.70E-02	1.65E-01	4.46E-03
2.80E-02	1.65E-01	4.62E-03
2.90E-02	1.65E-01	4.79E-03
3.00E-02	1.65E-01	4.95E-03
3.10E-02	1.65E-01	5.12E-03
3.20E-02	1.65E-01	5.28E-03
3.30E-02	1.65E-01	5.45E-03
3.40E-02	1.65E-01	5.61E-03
3.50E-02	1.65E-01	5.78E-03
3.60E-02	1.65E-01	5.94E-03
3.70E-02	1.65E-01	6.11E-03
3.80E-02	1.65E-01	6.27E-03
3.90E-02	1.65E-01	6.44E-03
4.00E-02	1.65E-01	6.60E-03
4.10E-02	1.65E-01	6.77E-03
4.20E-02	1.65E-01	6.93E-03
4.30E-02	1.65E-01	7.10E-03
4.40E-02	1.65E-01	7.26E-03
4.50E-02	1.65E-01	7.43E-03
4.60E-02	1.65E-01	7.59E-03
4.70E-02	1.65E-01	7.76E-03
4.80E-02	1.65E-01	7.92E-03
4.90E-02	1.65E-01	8.09E-03
5.00E-02	1.65E-01	8.25E-03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอ้างอิงกราฟรูปที่ 4.17

y	x	y	x
1	165	26	8165
2	235	27	8575
3	327	28	8975
4	443	29	9366
5	588	30	9746
6	764	31	10122
7	970	32	10494
8	1204	33	10850
9	1466	34	11199
10	1745	35	11547
11	2049	36	11880
12	2378	37	12210
13	2722	38	12523
14	3093	39	12829
15	3481	40	13136
16	3886	41	13426
17	4309	42	13714
18	4734	43	13996
19	5171	44	14272
20	5609	45	14537
21	6041	46	14792
22	6468	47	15044
23	6902	48	15286
24	7315	49	15522
25	7746	50	15750

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลอ้างอิงของกราฟรูปที่ 4.18

I (mA)	x1	x2	x3	x4	x5
1	165	185	185	186	187
2	190	204	203	205	209
3	222	233	233	240	238
4	260	270	268	276	271
5	298	313	313	319	316
6	358	368	366	370	368
7	413	433	430	433	429
8	493	500	501	502	499
9	573	577	578	580	577
10	664	665	669	667	665
11	769	765	767	768	767
12	874	869	872	870	869
13	991	982	989	989	989
14	1122	1116	1114	1120	1119
15	1257	1254	1248	1255	1256
16	1404	1397	1392	1402	1399
17	1564	1548	1546	1558	1559
18	1723	1712	1710	1716	1562
19	1891	1885	1878	1889	1889
20	2070	2062	2055	2059	2059
21	2282	2256	2267	2255	2244
22	2461	2440	2463	2444	2436
23	2663	2643	2659	2641	2637
24	2872	2856	2869	2853	2848
25	3081	3064	3082	3065	3059
26	3313	3294	3303	3295	3286
27	3539	3519	3515	3513	3508
28	3776	3751	3747	3746	3740
29	4020	3988	3979	3964	3913

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30	4260	4230	4220	4220	4220
31	4500	4470	4470	4470	4460
32	4740	4720	4710	4710	4710
33	4990	4970	4960	4960	4960
34	5240	5220	5220	5210	5210
35	5500	5480	5470	5470	5470
36	5750	5740	5730	5730	5730
37	6010	6000	5990	5990	5990
38	6270	6260	6230	6250	6250
39	6530	6520	6490	6510	6510
40	6790	6790	6760	6770	6770
41	7050	7040	7020	7030	7030
42	7310	7300	7280	7300	7300
43	7570	7560	7550	7570	7560
44	7820	7820	7810	7820	7810
45	8070	8070	8070	8080	8060
46	8320	8320	8320	8320	8320
47	8580	8580	8570	8580	8580
48	8830	8820	8830	8820	8830
49	9080	9070	9080	9080	9080
50	9320	9330	9320	9320	9330

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้งานในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEATURES

- Low V_{OS} $25\mu V$ Max
- Low V_{OS} Drift $0.6\mu V/^{\circ}C$ Max
- Ultra-Stable vs Time $1.0\mu V$ /Month Max
- Low Noise $0.6\mu V_{p-p}$ Max
- Wide Input Voltage Range $\pm 14V$
- Wide Supply Voltage Range $\pm 3V$ to $\pm 18V$
- Fits 725, 108A/308A, 741, AD510 Sockets
- $125^{\circ}C$ Temperature-Tested Dice

ORDERING INFORMATION

$T_A = +25^{\circ}C$ V_{OS} MAX (μV)	PACKAGE				OPERATING TEMPERATURE RANGE
	CERDIP TO-99	PLASTIC 8-PIN	LCC 20-CONTACT		
25	OP07AJ [†]	OP07AZ [†]	—	—	MIL COM
75	OP07EJ	OP07EZ	OP07EP	—	COM
75	OP07J [†]	OP07Z [†]	—	OP07RC/883	MIL XIND
150	OP07CJ	OP07CZ	OP07CP	—	XIND
150	—	—	OP07CS ^{††}	—	XIND
150	OP07DJ	—	OP07DP	—	XIND

[†] For devices processed in total compliance to MIL-STD-883, add /883 after part number. Consult factory for 883 data sheet.
^{††} Burn-in is available on commercial and industrial temperature range parts in CerDIP, plastic DIP, and TO-can packages.
^{†††} For availability and burn-in information on SO and PLCC packages, contact your local sales office.

GENERAL DESCRIPTION

The OP-07 has very low input offset voltage ($25\mu V$ max for OP-07A) which is obtained by trimming at the wafer stage. These low offset voltages generally eliminate any need for external nulling. The OP-07 also features low input bias current ($\pm 2nA$ for OP-07A) and high open-loop gain ($300V/mV$ for OP-07A). The low offsets and high open-loop gain make the OP-07 particularly useful for high-gain instrumentation applications.

The wide input voltage range of $\pm 13V$ minimum combined with high CMRR of 110dB (OP-07A) and high input impedance provides high accuracy in the noninverting circuit configuration. Excellent linearity and gain accuracy can be maintained

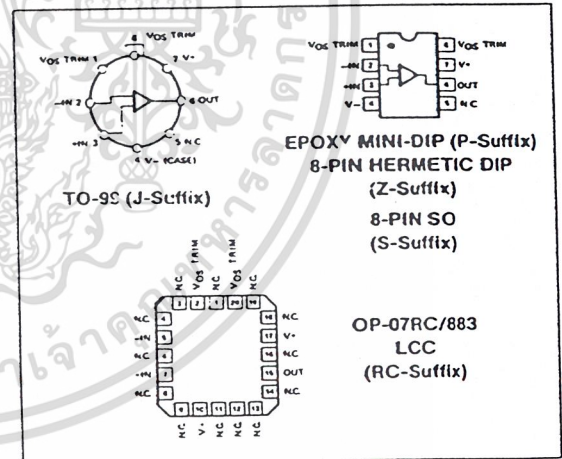
even at high closed-loop gains.

Stability of offsets and gain with time or variations in temperature is excellent. The accuracy and stability of the OP-07, even at high gain, combined with the freedom from external nulling have made the OP-07 a new industry standard for instrumentation and military applications.

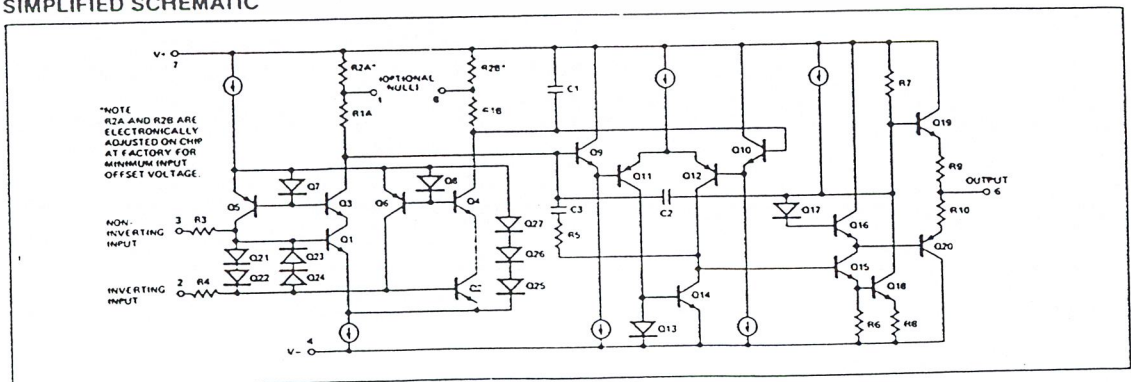
The OP-07 is available in five standard performance grades. The OP-07A and the OP-07 are specified for operation over the full military range of $-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$; the OP-07E is specified for operation over the $0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$ range, and OP-07C and D over the $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range.

The OP-07 is available in hermetically-sealed TO-99 metal can or ceramic 8-pin Mini-DIP, and in epoxy 8-pin Mini-DIP. It is a direct replacement for 725, 108A, and OP-05 amplifiers; 741-types may be directly replaced by removing the 741's nulling potentiometer. The OP-207, a dual OP-07, is available for applications requiring close matching of two OP-07 amplifiers. For improved specifications, see the OP-77/OP-177.

PIN CONNECTIONS



SIMPLIFIED SCHEMATIC



OP-07

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Supply Voltage	±22V
Differential Input Voltage	±30V
Input Voltage (Note 2)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range	
J, RC and Z Packages	-65°C to +150°C
P Package	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
OP-07A, OP-07, OP-07RC	-55°C to +125°C
OP-07E	0°C to +70°C
OP-07C, OP-07D	-40°C to +85°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C
Junction Temperature (T _J)	+150°C

PACKAGE TYPE	θ _{JA} (Note 3)	θ _{JC}	UNITS
TO-99 (J)	150	18	°C/W
8-Pin Hermetic DIP (Z)	148	16	°C/W
8-Pin Plastic DIP (P)	103	43	°C/W
20-Contact LCC	98	38	°C/W
8-Pin SO (S)	158	43	°C/W

NOTES:

1. Absolute maximum ratings apply to both DICE and packaged parts, unless otherwise noted.
2. For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
3. θ_{JA} is specified for worst case mounting conditions, i.e., θ_{JA} is specified for device in socket for TO, CarDIP, P-DIP, and LCC packages; θ_{JA} is specified for device soldered to printed circuit board for SO package.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at V_S = ±15V, T_A = 25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V _{OS}	(Note 1)	—	10	25	—	30	75	μV
Long-Term Input Offset Voltage Stability	ΔV _{OS} /Time	(Note 2)	—	0.2	1.0	—	0.2	1.0	μV/Mo
Input Offset Current	I _{OS}		—	0.3	2.0	—	0.4	2.8	nA
Input Bias Current	I _B		—	±0.7	±2.0	—	±1.0	±3.0	nA
Input Noise Voltage	e _{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	0.35	0.6	—	0.35	0.6	μV _{p-p}
Input Noise Voltage Density	e _n	f _O = 10Hz (Note 3)	—	10.3	18.0	—	10.3	18.0	nV/√Hz
		f _O = 100Hz (Note 3)	—	10.0	13.0	—	10.0	13.0	
		f _O = 1000Hz (Note 3)	—	9.6	11.0	—	9.6	11.0	
Input Noise Current	i _{np-p}	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	14	30	—	14	30	pA _{p-p}
Input Noise Current Density	i _n	f _O = 10Hz (Note 3)	—	0.32	0.80	—	0.32	0.80	pA/√Hz
		f _O = 100Hz (Note 3)	—	0.14	0.23	—	0.14	0.23	
		f _O = 1000Hz (Note 3)	—	0.12	0.17	—	0.12	0.17	
Input Resistance — Differential-Mode	R _{IN}	(Note 4)	30	60	—	20	60	—	MΩ
Input Resistance — Common-Mode	R _{INCM}		—	200	—	—	200	—	GΩ
Input Voltage Range	I _{VR}		±13	±14	—	±13	±14	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13V	110	126	—	110	126	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3V to ±18V	—	4	10	—	4	10	μV/V
Large-Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2kΩ, V _O = ±10V	300	500	—	200	500	—	V/mV
		R _L ≥ 500Ω, V _O = ±0.5V, V _S = ±3V (Note 4)	150	400	—	150	400	—	
		R _L ≥ 10kΩ	±12.5	±13.0	—	±12.5	±13.0	—	
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 2kΩ	±12.0	±12.8	—	±12.0	±12.8	—	V
		R _L ≥ 1kΩ	±10.5	±12.0	—	±10.5	±12.0	—	
		R _L ≥ 2kΩ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	
Slew Rate	SR	R _L ≥ 2kΩ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	V/μs
Closed-Loop Bandwidth	BW	A _{VCL} = +1 (Note 3)	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	MHz
Open-Loop Output Resistance	R _O	V _O = 0, I _O = 0	—	60	—	—	60	—	Ω
Power Consumption	P _d	V _S = ±15V, No Load	—	75	120	—	75	120	mW
		V _S = ±3V, No Load	—	4	6	—	4	6	
Offset Adjustment Range		R _P = 20kΩ	—	±4	—	—	±4	—	mV

NOTES:

1. OP-07A grade V_{OS} is measured approximately one minute after application of power. For all other grades V_{OS} is measured approximately 0.5 seconds after application of power.
2. Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation.

Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically 2.5μV — refer to typical performance curves. Parameter is sample tested.

3. Sample tested.
4. Guaranteed by design.

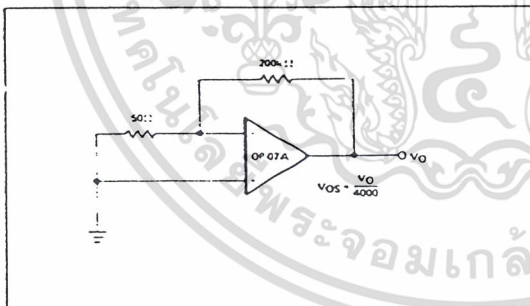
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	25	60	—	60	200	μV
Average Input Offset Voltage Drift Without External Trim	TCV_{OS}	(Note 2)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu V/^\circ C$
With External Trim	TCV_{OSn}	$R_F = 20k\Omega$ (Note 3)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.8	4	—	1.2	5.6	nA
Average Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	(Note 2)	—	5	25	—	8	50	$pA/^\circ C$
Input Bias Current	I_B		—	±1	±4	—	±2	±6	nA
Average Input Bias Current Drift	TCI_B	(Note 2)	—	8	25	—	13	50	$pA/^\circ C$
Input Voltage Range	IVR		±13	±13.5	—	±13	±13.5	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	106	123	—	106	123	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$	—	5	20	—	5	20	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$, $V_O = \pm 10V$	200	400	—	150	400	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	±12	±12.6	—	±12	±12.6	—	V

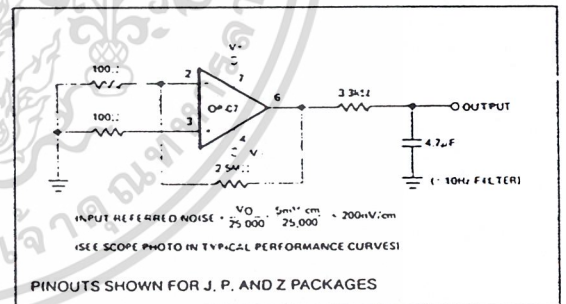
NOTES:

- OP-07A grade V_{OS} is measured approximately one minute after application of power. For all other grades V_{OS} is measured approximately 0.5 seconds after application of power.
- Sample tested.
- Guaranteed by design.

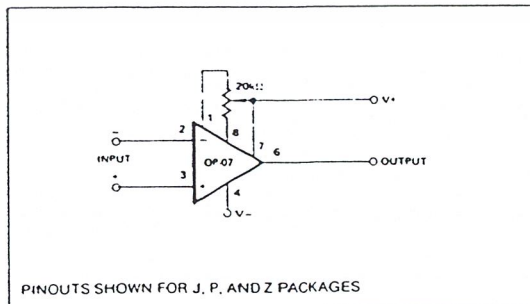
TYPICAL OFFSET VOLTAGE TEST CIRCUIT



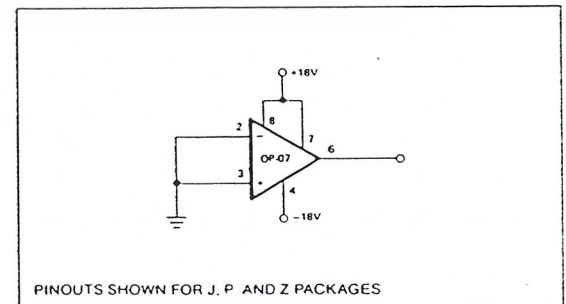
TYPICAL LOW-FREQUENCY NOISE TEST CIRCUIT



OPTIONAL OFFSET NULLING CIRCUIT



BURN-IN CIRCUIT



OP-07

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07E			OP-07C			OP-07D			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	30	75	—	60	150	—	60	150	μV
Long-Term V_{OS} Stability	$V_{OS}/Time$	(Note 2)	—	0.3	1.5	—	0.4	2.0	—	0.5	3.0	$\mu V/Mo$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.5	3.8	—	0.8	6.0	—	0.8	6.0	nA
Input Bias Current	I_B		—	± 1.2	± 4.0	—	± 1.8	± 7.0	—	± 2.0	± 12	nA
Input Noise Voltage	$e_{n(p-p)}$	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	0.35	0.6	—	0.38	0.65	—	0.38	0.65	μV_{p-p}
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_O = 10Hz$	—	10.3	18.0	—	10.5	20.0	—	10.5	20.0	nV/\sqrt{Hz}
		$f_O = 100Hz$ (Note 3)	—	10.0	13.0	—	10.2	13.5	—	10.3	13.5	
		$f_O = 1000Hz$	—	9.6	11.0	—	9.8	11.5	—	9.8	11.5	
Input Noise Current	$i_{n(p-p)}$	0.1Hz to 10Hz (Note 3)	—	14	30	—	15	35	—	15	35	pA_{p-p}
Input Noise Current Density	i_n	$f_O = 10Hz$	—	0.32	0.80	—	0.35	0.90	—	0.35	0.90	pA/\sqrt{Hz}
		$f_O = 100Hz$ (Note 3)	—	0.14	0.23	—	0.15	0.27	—	0.15	0.27	
		$f_O = 1000Hz$	—	0.12	0.17	—	0.13	0.18	—	0.13	0.18	
Input Resistance — Differential-Mode	R_{IW}	(Note 4)	15	50	—	8	33	—	7	31	—	$M\Omega$
Input Resistance — Common-Mode	$R_{i(CM)}$		—	160	—	—	120	—	—	120	—	$G\Omega$
Input Voltage Range	IVR		± 13	± 14	—	± 13	± 14	—	± 13	± 14	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13V$	106	123	—	100	120	—	94	110	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 16V$	—	5	20	—	7	32	—	7	32	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$ $V_O = \pm 10V$ $R_L \geq 500\Omega$	200	500	—	120	400	—	120	400	—	V/mV
		$V_O = \pm 0.5V$ $V_S = \pm 3V$ (Note 4)	150	400	—	100	400	—	—	400	—	
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 10k\Omega$	± 12.5	± 13.0	—	± 12.0	± 13.0	—	± 12.0	± 13.0	—	V
		$R_L \geq 2k\Omega$	± 12.0	± 12.8	—	± 11.5	± 12.8	—	± 11.5	± 12.8	—	
		$R_L \geq 1k\Omega$	± 10.5	± 12.0	—	—	± 12.0	—	—	± 12.0	—	
Slew Rate	SR	$R_L \geq 2k\Omega$ (Note 3)	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	0.1	0.3	—	$V/\mu s$
Closed-Loop Bandwidth	BW	$A_{VCL} = -1$ Note 5	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	0.4	0.6	—	MHz
Open-Loop Output Resistance	R_O	$V_O = 0, I_O = 0$	—	60	—	—	60	—	—	60	—	Ω
Power Consumption	P_d	$V_S = \pm 15V$, No Load	—	75	120	—	80	150	—	80	150	mW
		$V_S = \pm 3V$, No Load	—	4	6	—	4	8	—	4	8	
Offset Adjustment Range		$R_p = 20k\Omega$	—	± 4	—	—	± 4	—	—	± 4	—	mV

NOTES:

- Input Offset Voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power.
- Long-Term Input Offset Voltage Stability refers to the averaged trend line of V_{OS} vs. Time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically $2.5\mu V$ — refer to typical performance curves. Parameter is sample tested.
- Sample tested.
- Guaranteed by design.
- Guaranteed but not tested.

OP-07

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15V$, $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ for OP-07E, and $-20^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ for OP-07C/D, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07E			OP-07C			OP-07D			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	(Note 1)	—	45	130	—	85	250	—	85	250	μV
Average Input Offset Voltage Drift Without External Trim	TCV_{OS}	(Note 3)	—	0.3	1.3	—	0.5	1.8	—	0.7	2.5	$\mu V/^\circ C$
With External Trim	TCV_{OSn}	$R_p = 20k\Omega$ (Note 3)	—	0.3	1.3	—	0.4	1.6	—	0.7	2.5	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.9	5.3	—	1.6	8.0	—	1.6	8.0	nA
Average Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	(Note 2)	—	6	35	—	12	50	—	12	50	$pA/^\circ C$
Input Bias Current	I_B		—	± 1.5	± 5.5	—	± 2.2	± 9.0	—	± 3.0	± 14	nA
Average Input Bias Current Drift	TCI_B	(Note 2)	—	13	35	—	18	50	—	18	50	$pA/^\circ C$
Input Voltage Range	IVR		± 13.0	± 13.5	—	± 13.0	± 13.5	—	± 13.0	± 13.5	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = 13V$	103	123	—	97	120	—	94	106	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$	—	7	32	—	10	51	—	10	51	$\mu V/V$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2k\Omega$ $V_O = \pm 10V$	160	450	—	100	400	—	100	400	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2k\Omega$	± 12	± 12.6	—	± 11	± 12.6	—	± 11	± 12.6	—	V

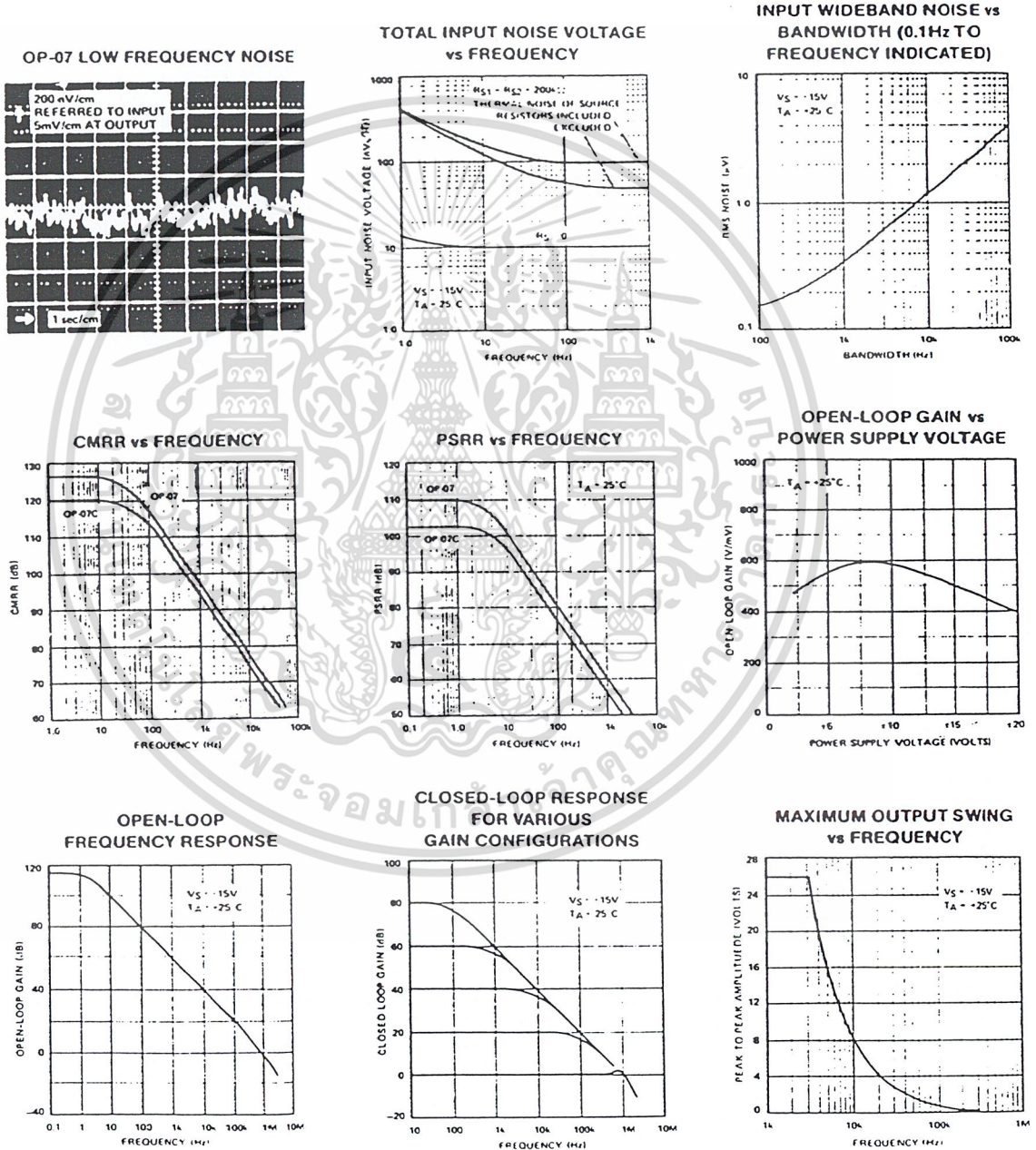
NOTES:

- 1 Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power
- 2 Sample tested
- 3 Guaranteed by design

2

OP-07

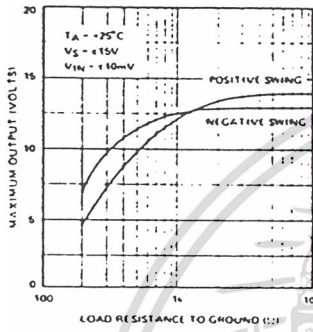
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



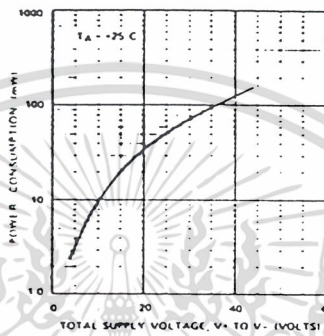
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 2-544 OPERATIONAL AMPLIFIERS
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

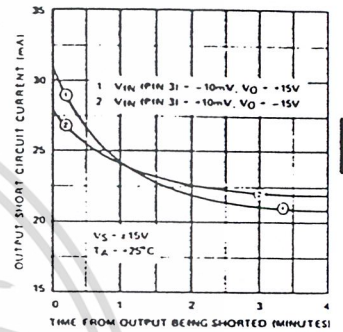
MAXIMUM OUTPUT VOLTAGE vs LOAD RESISTANCE



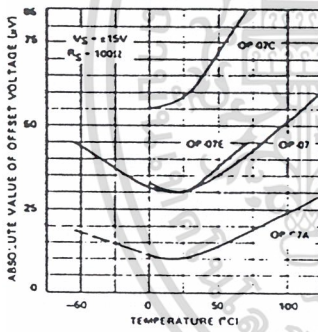
POWER CONSUMPTION vs POWER SUPPLY



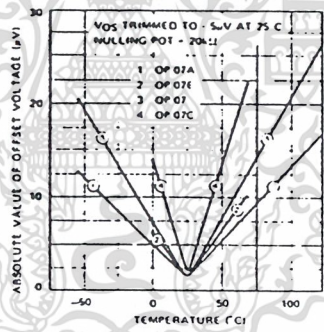
OUTPUT SHORT-CIRCUIT CURRENT vs TIME



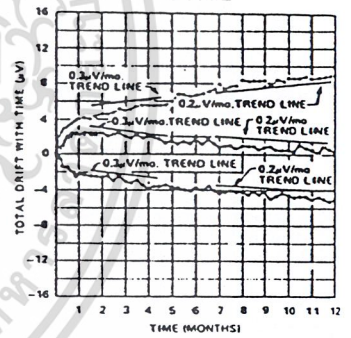
UNTRIMMED OFFSET VOLTAGE vs TEMPERATURE



TRIMMED OFFSET VOLTAGE vs TEMPERATURE

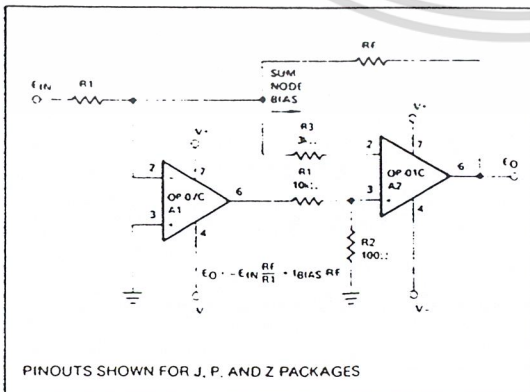


OFFSET VOLTAGE STABILITY vs TIME

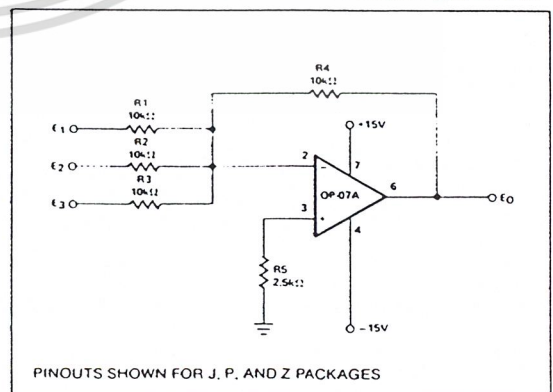


TYPICAL APPLICATIONS

HIGH SPEED, LOW VOS, COMPOSITE AMPLIFIER



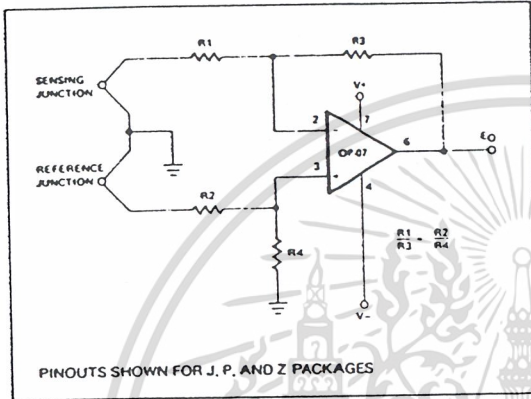
ADJUSTMENT-FREE PRECISION SUMMING AMPLIFIER



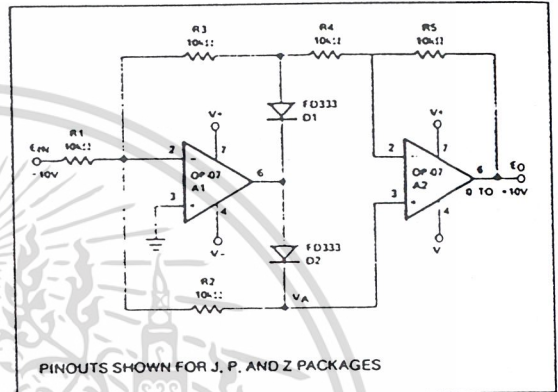
OP-07

TYPICAL APPLICATIONS

HIGH-STABILITY THERMOCOUPLE AMPLIFIER



PRECISION ABSOLUTE-VALUE CIRCUIT



APPLICATIONS INFORMATION

OP-07 series units may be substituted directly into 725, 108A/308A* and OP-05 sockets with or without removal of external compensation or nulling components. Additionally, the OP-07 may be used in unnullled 741-type sockets. However, if conventional 741 nulling circuitry is in use, it should be modified or removed to enable proper OP-07 operation. OP-07 offset voltage may be nulled to zero through use of a potentiometer (see offset nulling circuit diagram).

The OP-07 provides stable operation with load capacitance of up to 500pF and $\pm 10V$ swings; larger capacitances should be decoupled with a 50 Ω decoupling resistor.

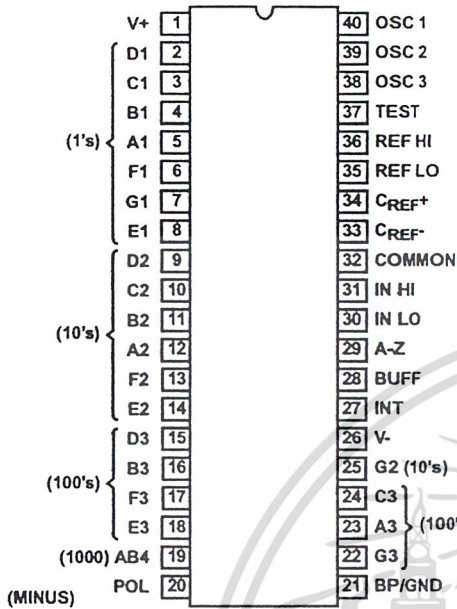
Stray thermoelectric voltages generated by dissimilar metals at the contacts to the input terminals can degrade drift performance. Therefore, best operation will be obtained when both input contacts are maintained at the same temperature, preferably close to the package temperature.

*TO-99 Package only

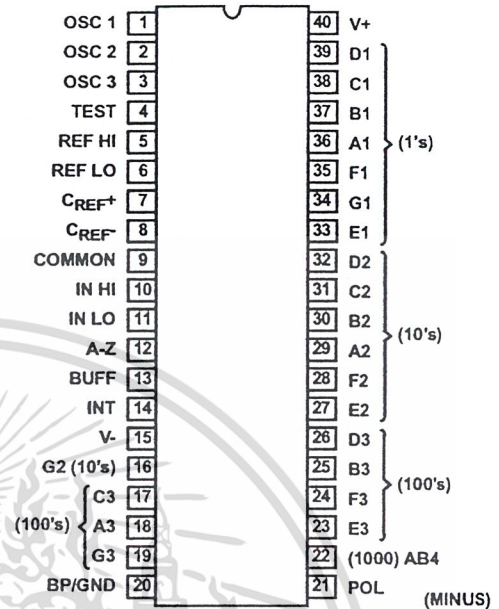
ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Pinouts

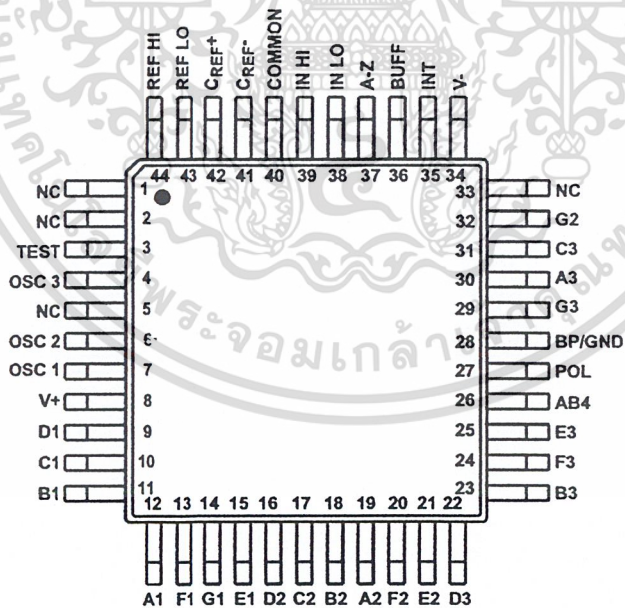
ICL7106, ICL7107 (PDIP)
TOP VIEW



ICL7106R, ICL7107R (PDIP)
TOP VIEW



ICL7106, ICL7107 (MQFP)
TOP VIEW



ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	
ICL7106, V+ to V-	15V
ICL7107, V+ to GND	6V
ICL7107, V- to GND	-9V
Analog Input Voltage (Either Input) (Note 1)	V+ to V-
Reference Input Voltage (Either Input)	V+ to V-
Clock Input	
ICL7106	TEST to V+
ICL7107	GND to V+

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 2)	θ_{JA} (°C/W)
PDIP Package	50
MQFP Package	80
Maximum Junction Temperature	150°C
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C
(MQFP - Lead Tips Only)	

Operating Conditions

Temperature Range 0°C to 70°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTES:

- Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to $\pm 100\mu\text{A}$.
- θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications (Note 3)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
SYSTEM PERFORMANCE					
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0V$, Full Scale = 200mV	-000.0	± 000.0	+000.0	Digital Reading
Stability (Last Digit) (ICL7106S, ICL7107S Only)	Fixed Input Voltage (Note 7)	-000.0	± 000.0	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF}$, $V_{REF} = 100mV$	999	999/1000	1000	Digital Reading
Rollover Error	$-V_{IN} = +V_{IN} \cong 200mV$ Difference in Reading for Equal Positive and Negative Inputs Near Full Scale	-	± 0.2	± 1	Counts
Linearity	Full Scale = 200mV or Full Scale = 2V Maximum Deviation from Best Straight Line Fit (Note 6)	-	± 0.2	± 1	Counts
Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = 1V$, $V_{IN} = 0V$, Full Scale = 200mV (Note 6)	-	50	-	$\mu\text{V/V}$
Noise	$V_{IN} = 0V$, Full Scale = 200mV (Peak-To-Peak Value Not Exceeded 95% of Time)	-	15	-	μV
Leakage Current Input	$V_{IN} = 0$ (Note 6)	-	1	10	pA
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0$, 0°C To 70°C (Note 6)	-	0.2	1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Scale Factor Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199mV$, 0°C To 70°C, (Ext. Ref. 0ppm/°C) (Note 6)	-	1	5	ppm/°C
End Power Supply Character V+ Supply Current	$V_{IN} = 0$ (Does Not Include LED Current for ICL7107)	-	1.0	1.8	mA
End Power Supply Character V- Supply Current	ICL7107 Only	-	0.6	1.8	mA
COMMON Pin Analog Common Voltage	25k Ω Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	2.4	3.0	3.2	V
Temperature Coefficient of Analog Common	25k Ω Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	-	80	-	ppm/°C
DISPLAY DRIVER ICL7106 ONLY					
Peak-To-Peak Segment Drive Voltage	V+ = to V- = 9V (Note 5)	4	5.5	6	V
Peak-To-Peak Backplane Drive Voltage					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Electrical Specifications (Note 3) (Continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
DISPLAY DRIVER ICL7107 ONLY					
Segment Sinking Current (Except Pins 19 and 20)	V+ = 5V, Segment Voltage = 3V	5	8	-	mA
Pin 19 Only		10	16	-	mA
Pin 20 Only		4	7	-	mA

NOTES:

3. Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board.
4. Unless otherwise noted, specifications apply to both the ICL7106 and ICL7107 at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $f_{\text{CLOCK}} = 48\text{kHz}$. ICL7106 is tested in the circuit of Figure 1. ICL7107 is tested in the circuit of Figure 2.
5. Back plane drive is in phase with segment drive for 'off' segment, 180 degrees out of phase for 'on' segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.
6. Not tested, guaranteed by design.
7. Sample Tested.

Typical Applications and Test Circuits

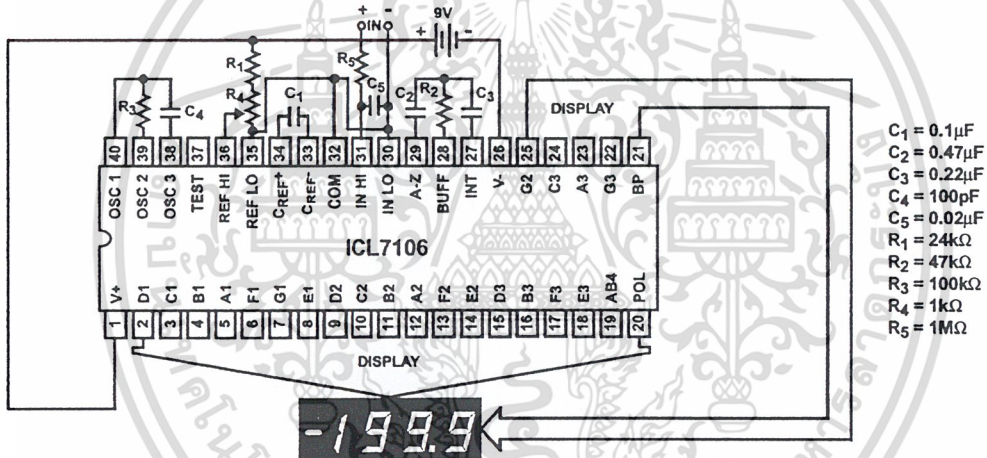


FIGURE 1. ICL7106 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LCD DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL SCALE

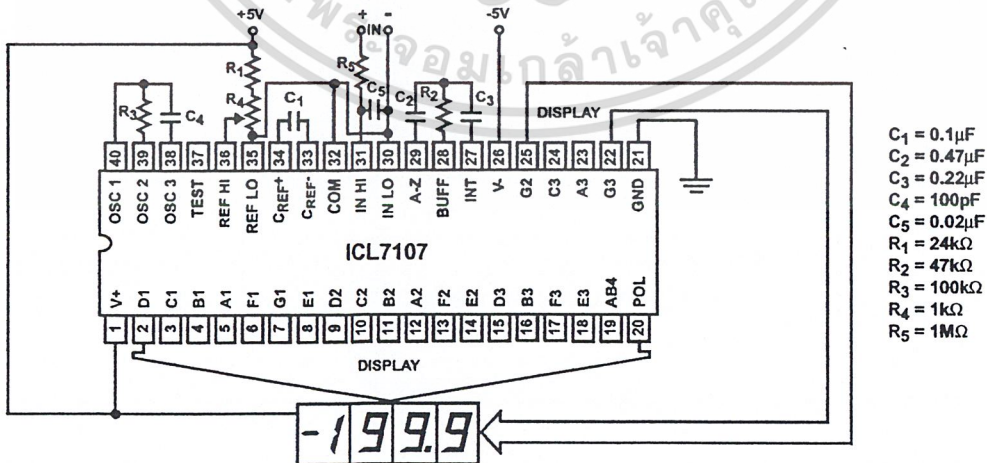


FIGURE 2. ICL7107 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LED DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL SCALE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design Information Summary Sheet

• **OSCILLATOR FREQUENCY**

$f_{OSC} = 0.45/RC$
 $C_{OSC} > 50pF$; $R_{OSC} > 50k\Omega$
 $f_{OSC} (Typ) = 48kHz$

• **OSCILLATOR PERIOD**

$t_{OSC} = RC/0.45$

• **INTEGRATION CLOCK FREQUENCY**

$f_{CLOCK} = f_{OSC}/4$

• **INTEGRATION PERIOD**

$t_{INT} = 1000 \times (4/f_{OSC})$

• **60/50Hz REJECTION CRITERION**

t_{INT}/t_{60Hz} or $t_{INT}/t_{50Hz} = \text{Integer}$

• **OPTIMUM INTEGRATION CURRENT**

$I_{INT} = 4\mu A$

• **FULL SCALE ANALOG INPUT VOLTAGE**

$V_{INFS} (Typ) = 200mV$ or $2V$

• **INTEGRATE RESISTOR**

$$R_{INT} = \frac{V_{INFS}}{I_{INT}}$$

• **INTEGRATE CAPACITOR**

$$C_{INT} = \frac{(t_{INT})(I_{INT})}{V_{INT}}$$

• **INTEGRATOR OUTPUT VOLTAGE SWING**

$$V_{INT} = \frac{(t_{INT})(I_{INT})}{C_{INT}}$$

• **V_{INT} MAXIMUM SWING:**

$(V^- + 0.5V) < V_{INT} < (V^+ - 0.5V)$, $V_{INT} (Typ) = 2V$

• **DISPLAY COUNT**

$$COUNT = 1000 \times \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$$

• **CONVERSION CYCLE**

$t_{CYC} = t_{CLOCK} \times 4000$
 $t_{CYC} = t_{OSC} \times 16,000$
 when $f_{OSC} = 48kHz$; $t_{CYC} = 333ms$

• **COMMON MODE INPUT VOLTAGE**

$(V^- + 1V) < V_{IN} < (V^+ - 0.5V)$

• **AUTO-ZERO CAPACITOR**

$0.01\mu F < C_{AZ} < 1\mu F$

• **REFERENCE CAPACITOR**

$0.1\mu F < C_{REF} < 1\mu F$

• **V_{COM}**

Biased between V_i and V^- .

• **V_{COM} \approx V⁺ - 2.8V**

Regulation lost when V^+ to $V^- < \approx 6.8V$
 If V_{COM} is externally pulled down to $(V^+ \text{ to } V^-)/2$,
 the V_{COM} circuit will turn off.

• **ICL7106 POWER SUPPLY: SINGLE 9V**

$V^+ - V^- = 9V$
 Digital supply is generated internally
 $V_{GND} \approx V^+ - 4.5V$

• **ICL7106 DISPLAY: LCD**

Type: Direct drive with digital logic supply amplitude.

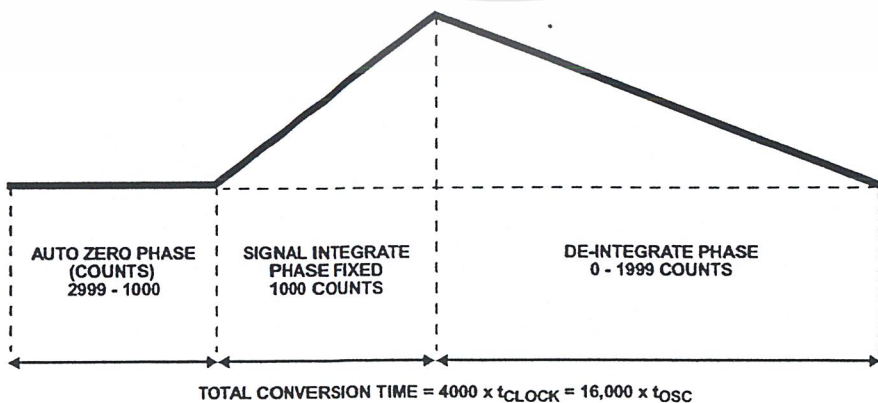
• **ICL7107 POWER SUPPLY: DUAL $\pm 5.0V$**

$V^+ = +5V$ to GND
 $V^- = -5V$ to GND
 Digital Logic and LED driver supply V^+ to GND

• **ICL7107 DISPLAY: LED**

Type: Non-Multiplexed Common Anode

Typical Integrator Amplifier Output Waveform (INT Pin)



Detailed Description

Analog Section

Figure 3 shows the Analog Section for the ICL7106 and ICL7107. Each measurement cycle is divided into three phases. They are (1) auto-zero (A-Z), (2) signal integrate (INT) and (3) de-integrate (DE).

Auto-Zero Phase

During auto-zero three things happen. First, input high and low are disconnected from the pins and internally shorted to analog COMMON. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor C_{AZ} to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator, and comparator. Since the comparator is included in the loop, the A-Z accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than $10\mu V$.

Signal Integrate Phase

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The converter then integrates the differential voltage between IN HI and IN LO for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range: up to 1V from either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, IN LO can be tied to analog COMMON to establish the correct common mode voltage. At

the end of this phase, the polarity of the integrated signal is determined.

De-Integrate Phase

The final phase is de-integrate, or reference integrate. Input low is internally connected to analog COMMON and input high is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the correct polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is:

$$DISPLAY\ COUNT = 1000 \left(\frac{V_{IN}}{V_{REF}} \right)$$

Differential Input

The input can accept differential voltages anywhere within the common mode range of the input amplifier, or specifically from 0.5V below the positive supply to 1V above the negative supply. In this range, the system has a CMRR of 86dB typical. However, care must be exercised to assure the integrator output does not saturate. A worst case condition would be a large positive common mode voltage with a near full scale negative differential input voltage. The negative input signal drives the integrator positive when most of its swing has been used up by the positive common mode voltage. For these critical applications the integrator output swing can be reduced to less than the recommended 2V full scale swing with little loss of accuracy. The integrator output can swing to within 0.3V of either supply without loss of linearity.

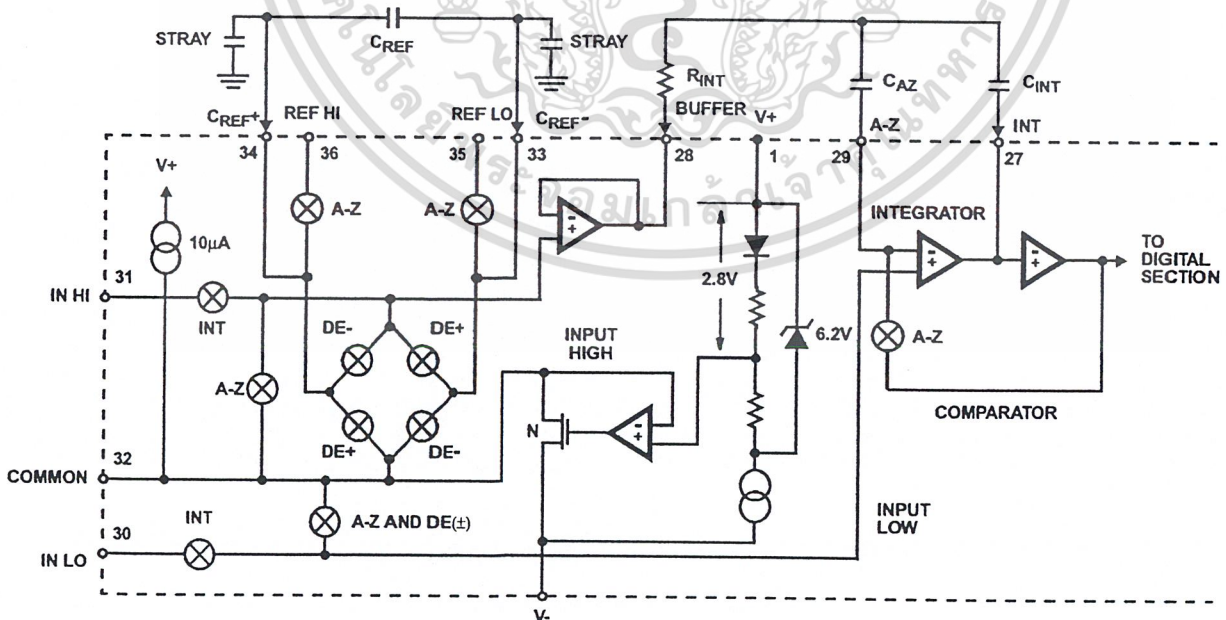


FIGURE 3. ANALOG SECTION OF ICL7106 AND ICL7107

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Differential Reference

The reference voltage can be generated anywhere within the power supply voltage of the converter. The main source of common mode error is a roll-over voltage caused by the reference capacitor losing or gaining charge to stray capacity on its nodes. If there is a large common mode voltage, the reference capacitor can gain charge (increase voltage) when called up to de-integrate a positive signal but lose charge (decrease voltage) when called up to de-integrate a negative input signal. This difference in reference for positive or negative input voltage will give a roll-over error. However, by selecting the reference capacitor such that it is large enough in comparison to the stray capacitance, this error can be held to less than 0.5 count worst case. (See Component Value Selection.)

Analog COMMON

This pin is included primarily to set the common mode voltage for battery operation (ICL7106) or for any system where the input signals are floating with respect to the power supply. The COMMON pin sets a voltage that is approximately 2.8V more negative than the positive supply. This is selected to give a minimum end-of-life battery voltage of about 6V. However, analog COMMON has some of the attributes of a reference voltage. When the total supply voltage is large enough to cause the zener to regulate ($>7V$), the COMMON voltage will have a low voltage coefficient (0.001%/V), low output impedance ($\approx 15\Omega$), and a temperature coefficient typically less than 80ppm/°C.

The limitations of the on chip reference should also be recognized, however. With the ICL7107, the internal heating which results from the LED drivers can cause some degradation in performance. Due to their higher thermal resistance, plastic parts are poorer in this respect than ceramic. The combination of reference Temperature Coefficient (TC), internal chip dissipation, and package thermal resistance can increase noise near full scale from 25 μV to 80 μV_{p-p} . Also the linearity in going from a high dissipation count such as 1000 (20 segments on) to a low dissipation count such as 1111 (8 segments on) can suffer by a count or more. Devices with a positive TC reference may require several counts to pull out of an over-range condition. This is because over-range is a low dissipation mode, with the three least significant digits blanked. Similarly, units with a negative TC may cycle between over-range and a non-over-range count as the die alternately heats and cools. All these problems are of course eliminated if an external reference is used.

The ICL7106, with its negligible dissipation, suffers from none of these problems. In either case, an external reference can easily be added, as shown in Figure 4.

Analog COMMON is also used as the input low return during auto-zero and de-integrate. If IN LO is different from analog COMMON, a common mode voltage exists in the system and is taken care of by the excellent CMRR of the converter. However, in some applications IN LO will be set at a fixed known voltage (power supply common for instance). In this application, analog COMMON should be tied to the same point, thus removing the common mode voltage from the converter. The same holds true for the reference voltage. If reference can be conveniently tied to analog COMMON, it

should be since this removes the common mode voltage from the reference system.

Within the IC, analog COMMON is tied to an N-Channel FET that can sink approximately 30mA of current to hold the voltage 2.8V below the positive supply (when a load is trying to pull the common line positive). However, there is only 10 μA of source current, so COMMON may easily be tied to a more negative voltage thus overriding the internal reference.

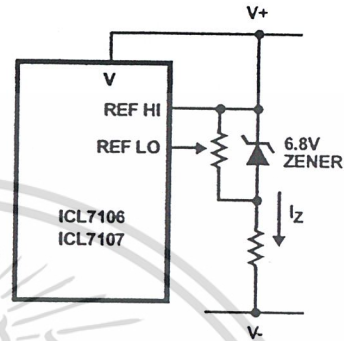


FIGURE 4A.

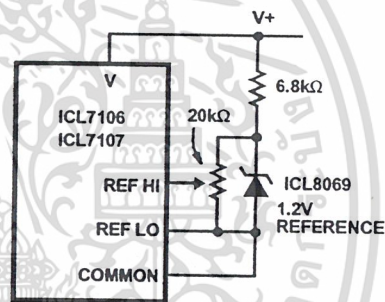


FIGURE 4B.

FIGURE 4. USING AN EXTERNAL REFERENCE

TEST

The TEST pin serves two functions. On the ICL7106 it is coupled to the internally generated digital supply through a 500 Ω resistor. Thus it can be used as the negative supply for externally generated segment drivers such as decimal points or any other presentation the user may want to include on the LCD display. Figures 5 and 6 show such an application. No more than a 1mA load should be applied.

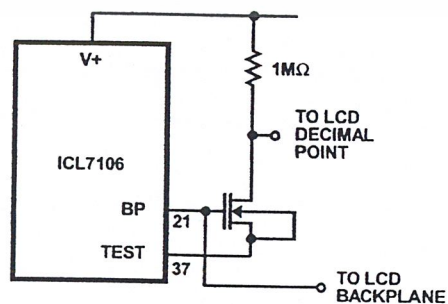


FIGURE 5. SIMPLE INVERTER FOR FIXED DECIMAL POINT

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

The second function is a "lamp test". When TEST is pulled high (to V+) all segments will be turned on and the display should read "1888". The TEST pin will sink about 15mA under these conditions.

CAUTION: In the lamp test mode, the segments have a constant DC voltage (no square-wave). This may burn the LCD display if maintained for extended periods.

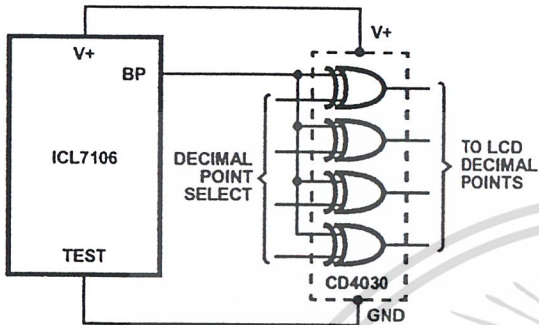


FIGURE 6. EXCLUSIVE 'OR' GATE FOR DECIMAL POINT DRIVE

Digital Section

Figures 7 and 8 show the digital section for the ICL7106 and ICL7107, respectively. In the ICL7106, an internal digital ground is generated from a 6V Zener diode and a large P-Channel source follower. This supply is made stiff to absorb the relative large capacitive currents when the back plane (BP) voltage is switched. The BP frequency is the clock frequency divided by 800. For three readings/sec., this is a 60Hz square wave with a nominal amplitude of 5V. The segments are driven at the same frequency and amplitude and are in phase with BP when OFF, but out of phase when ON. In all cases negligible DC voltage exists across the segments.

Figure 8 is the Digital Section of the ICL7107. It is identical to the ICL7106 except that the regulated supply and back plane drive have been eliminated and the segment drive has been increased from 2mA to 8mA, typical for instrument size common anode LED displays. Since the 1000 output (pin 19) must sink current from two LED segments, it has twice the drive capability or 16mA.

In both devices, the polarity indication is "on" for negative analog inputs. If IN LO and IN HI are reversed, this indication can be reversed also, if desired.

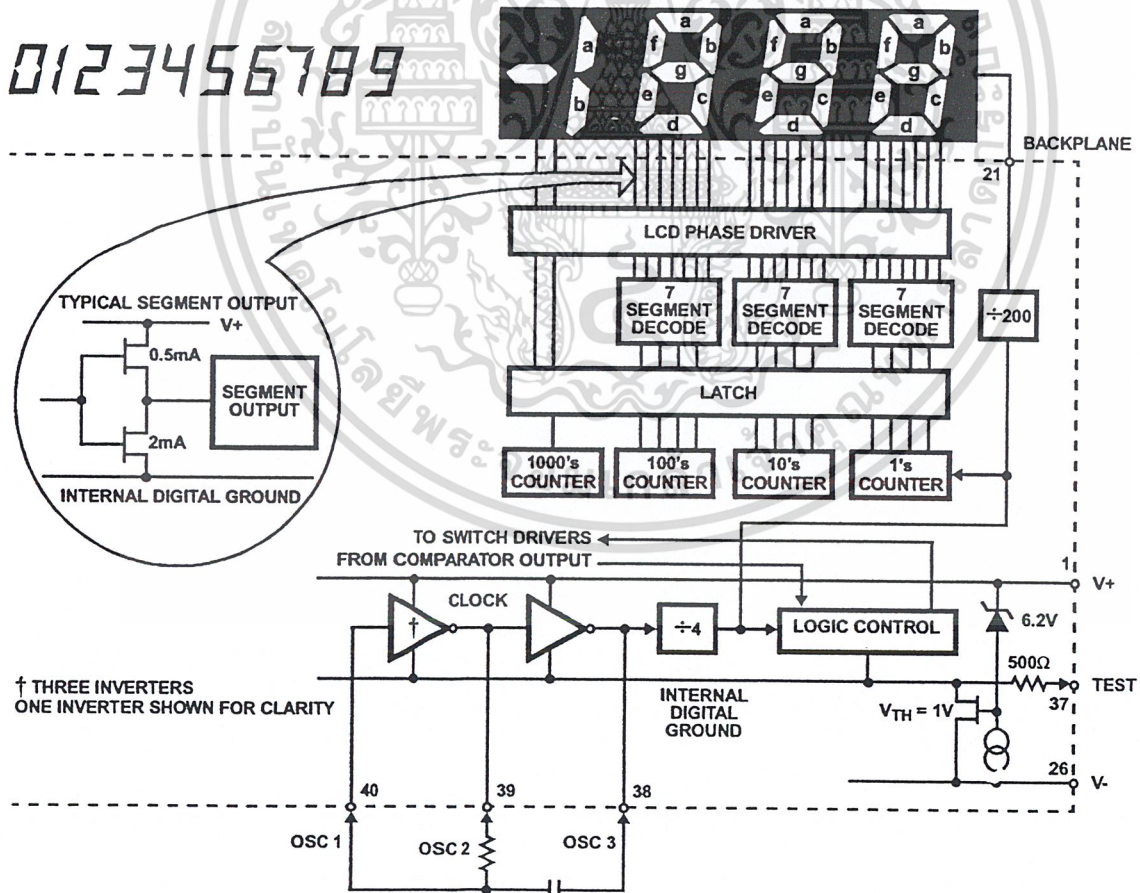


FIGURE 7. ICL7106 DIGITAL SECTION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0123456789

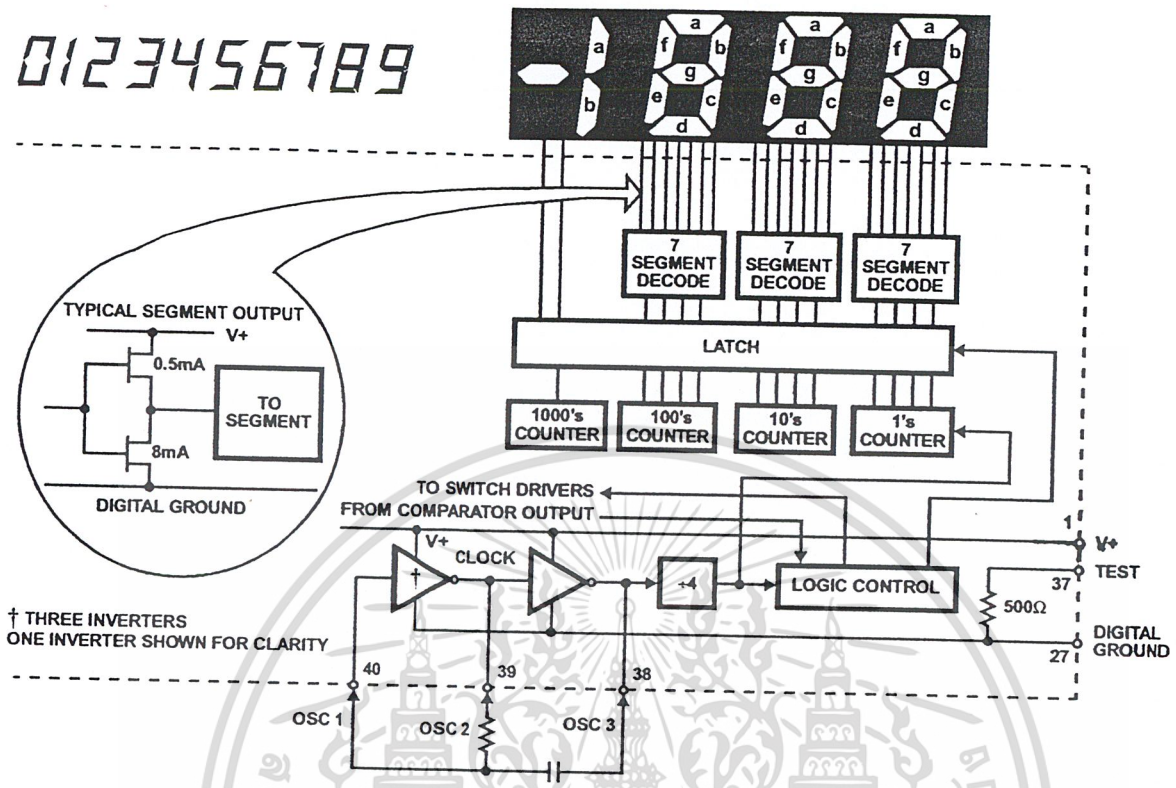


FIGURE 8. ICL7107 DIGITAL SECTION

System Timing

Figure 9 shows the clocking arrangement used in the ICL7106 and ICL7107. Two basic clocking arrangements can be used:

1. Figure 9A. An external oscillator connected to pin 40.
2. Figure 9B. An R-C oscillator using all three pins.

The oscillator frequency is divided by four before it clocks the decade counters. It is then further divided to form the three convert-cycle phases. These are signal integrate (1000 counts), reference de-integrate (0 to 2000 counts) and auto-zero (1000 to 3000 counts). For signals less than full scale, auto-zero gets the unused portion of reference de-integrate. This makes a complete measure cycle of 4,000 counts (16,000 clock pulses) independent of input voltage. For three readings/second, an oscillator frequency of 48kHz would be used.

To achieve maximum rejection of 60Hz pickup, the signal integrate cycle should be a multiple of 60Hz. Oscillator frequencies of 240kHz, 120kHz, 80kHz, 60kHz, 48kHz, 40kHz, $33\frac{1}{3}$ kHz, etc. should be selected. For 50Hz rejection, Oscillator frequencies of 200kHz, 100kHz, $66\frac{2}{3}$ kHz, 50kHz, 40kHz, etc. would be suitable. Note that 40kHz (2.5 readings/second) will reject both 50Hz and 60Hz (also 400Hz and 440Hz).

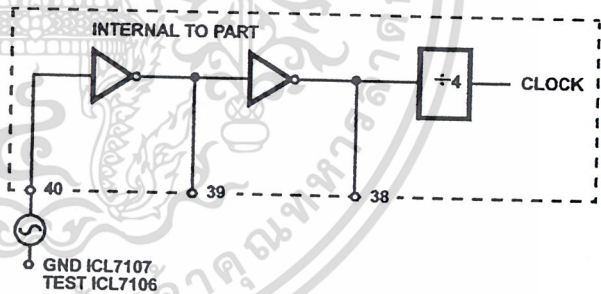


FIGURE 9A.

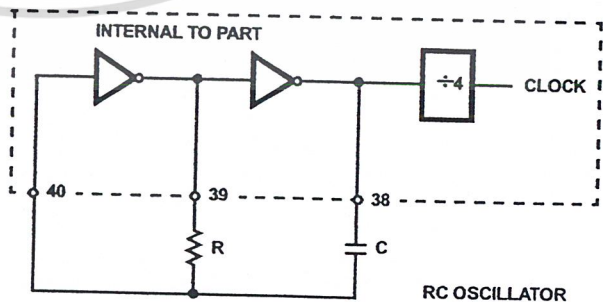


FIGURE 9B.

FIGURE 9. CLOCK CIRCUITS

Component Value Selection

Integrating Resistor

Both the buffer amplifier and the integrator have a class A output stage with 100µA of quiescent current. They can supply 4µA of drive current with negligible nonlinearity. The integrating resistor should be large enough to remain in this very linear region over the input voltage range, but small enough that undue leakage requirements are not placed on the PC board. For 2V full scale, 470kΩ is near optimum and similarly a 47kΩ for a 200mV scale.

Integrating Capacitor

The integrating capacitor should be selected to give the maximum voltage swing that ensures tolerance buildup will not saturate the integrator swing (approximately 0.3V from either supply). In the ICL7106 or the ICL7107, when the analog COMMON is used as a reference, a nominal +2V full-scale integrator swing is fine. For the ICL7107 with +5V supplies and analog COMMON tied to supply ground, a ±3.5V to +4V swing is nominal. For three readings/second (48kHz clock) nominal values for C_{INT} are 0.22µF and 0.10µF, respectively. Of course, if different oscillator frequencies are used, these values should be changed in inverse proportion to maintain the same output swing.

An additional requirement of the integrating capacitor is that it must have a low dielectric absorption to prevent roll-over errors. While other types of capacitors are adequate for this application, polypropylene capacitors give undetectable errors at reasonable cost.

Auto-Zero Capacitor

The size of the auto-zero capacitor has some influence on the noise of the system. For 200mV full scale where noise is very important, a 0.47µF capacitor is recommended. On the 2V scale, a 0.047µF capacitor increases the speed of recovery from overload and is adequate for noise on this scale.

Reference Capacitor

A 0.1µF capacitor gives good results in most applications. However, where a large common mode voltage exists (i.e., the REF LO pin is not at analog COMMON) and a 200mV scale is used, a larger value is required to prevent roll-over error. Generally 1µF will hold the roll-over error to 0.5 count in this instance.

Oscillator Components

For all ranges of frequency a 100kΩ resistor is recommended and the capacitor is selected from the equation:

$$f = \frac{0.45}{RC} \text{ For 48kHz Clock (3 Readings/sec),}$$

$$C = 100\text{pF.}$$

Reference Voltage

The analog input required to generate full scale output (2000 counts) is: $V_{IN} = 2V_{REF}$. Thus, for the 200mV and 2V scale, V_{REF} should equal 100mV and 1V, respectively. However, in many applications where the A/D is connected to a transducer, there will exist a scale factor other than unity between the input voltage and the digital reading. For instance, in a weighing system, the designer might like to have a full scale reading when the voltage from the transducer is 0.662V. Instead of dividing the input down to 200mV, the designer should use the input voltage directly and select $V_{REF} = 0.341V$. Suitable values for integrating resistor and capacitor would be 1 20kΩ and 0.22µF. This makes the system slightly quieter and also avoids a divider network on the input. The ICL7107 with ±5V supplies can accept input signals up to ±4V. Another advantage of this system occurs when a digital reading of zero is desired for $V_{IN} \neq 0$. Temperature and weighing systems with a variable fare are examples. This offset reading can be conveniently generated by connecting the voltage transducer between IN HI and COMMON and the variable (or fixed) offset voltage between COMMON and IN LO.

ICL7107 Power Supplies

The ICL7107 is designed to work from ±5V supplies. However, if a negative supply is not available, it can be generated from the clock output with 2 diodes, 2 capacitors, and an inexpensive IC. Figure 10 shows this application. See ICL7660 data sheet for an alternative.

In fact, in selected applications no negative supply is required. The conditions to use a single +5V supply are:

1. The input signal can be referenced to the center of the common mode range of the converter.
2. The signal is less than ±1.5V.
3. An external reference is used.

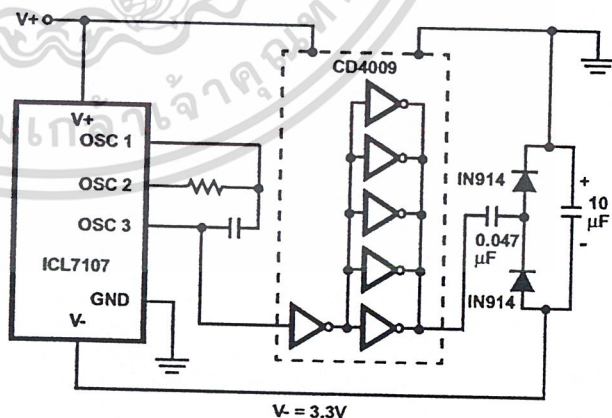


FIGURE 10. GENERATING NEGATIVE SUPPLY FROM +5V

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Typical Applications

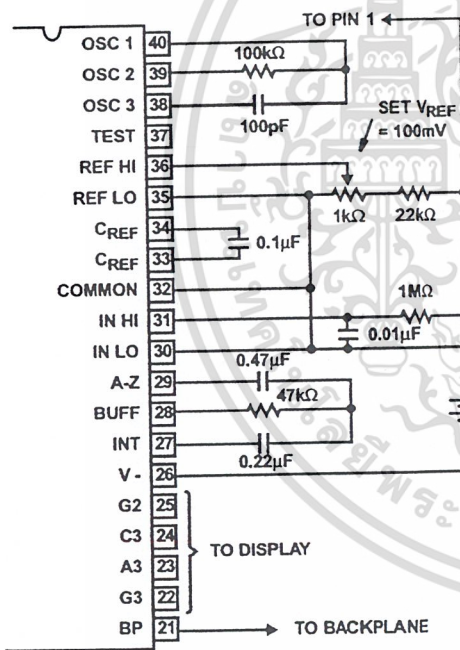
The ICL7106 and ICL7107 may be used in a wide variety of configurations. The circuits which follow show some of the possibilities, and serve to illustrate the exceptional versatility of these A/D converters.

The following application notes contain very useful information on understanding and applying this part and are available from Intersil Corporation.

Application Notes

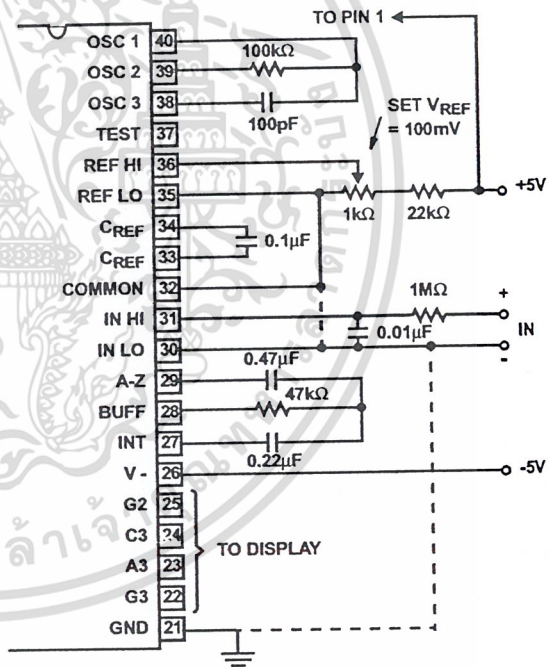
NOTE #	DESCRIPTION	AnswerFAX DOC. #
AN016	"Selecting A/D Converters"	9016
AN017	"The Integrating A/D Converter"	9017
AN018	"Do's and Don'ts of Applying A/D Converters"	9018
AN023	"Low Cost Digital Panel Meter Designs"	9023
AN032	"Understanding the Auto-Zero and Common Mode Performance of the ICL7136/7/9 Family"	9032
AN046	"Building a Battery-Operated Auto Ranging DVM with the ICL7106"	9046
AN052	"Tips for Using Single Chip 3 ¹ / ₂ Digit A/D Converters"	9052

Typical Applications



Values shown are for 200mV full scale, 3 readings/sec., floating supply voltage (9V battery).

FIGURE 11. ICL7106 USING THE INTERNAL REFERENCE



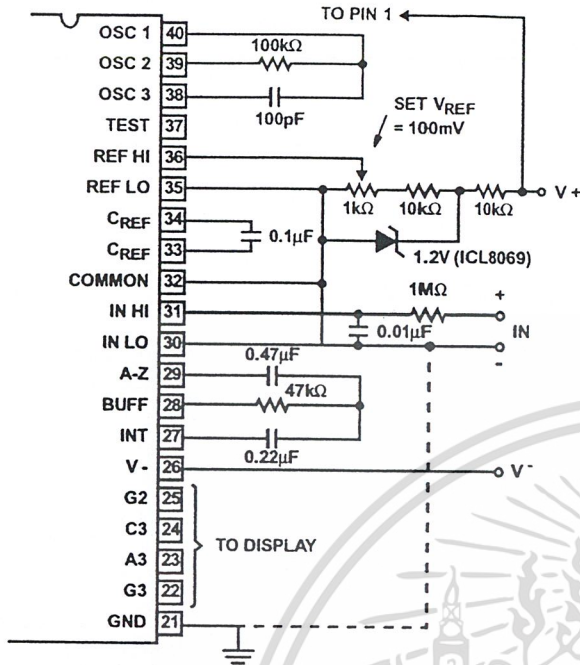
Values shown are for 200mV full scale, 3 readings/sec. IN LO may be tied to either COMMON for inputs floating with respect to supplies, or GND for single ended inputs. (See discussion under Analog COMMON.)

FIGURE 12. ICL7107 USING THE INTERNAL REFERENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

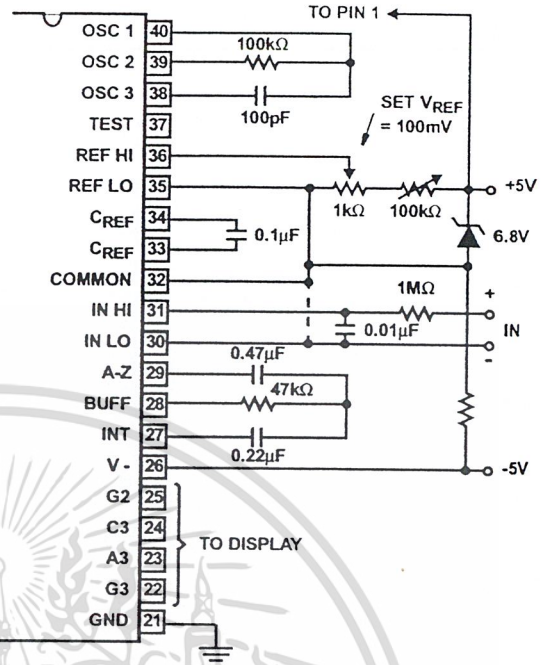
ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Typical Applications (Continued)



IN LO is tied to supply COMMON establishing the correct common mode voltage. If COMMON is not shorted to GND, the input voltage may float with respect to the power supply and COMMON acts as a pre-regulator for the reference. If COMMON is shorted to GND, the input is single ended (referred to supply GND) and the pre-regulator is overridden.

FIGURE 13. ICL7107 WITH AN EXTERNAL BAND-GAP REFERENCE (1.2V TYPE)



Since low TC zeners have breakdown voltages ~ 6.8V, diode must be placed across the total supply (10V). As in the case of Figure 14, IN LO may be tied to either COMMON or GND.

FIGURE 14. ICL7107 WITH ZENER DIODE REFERENCE

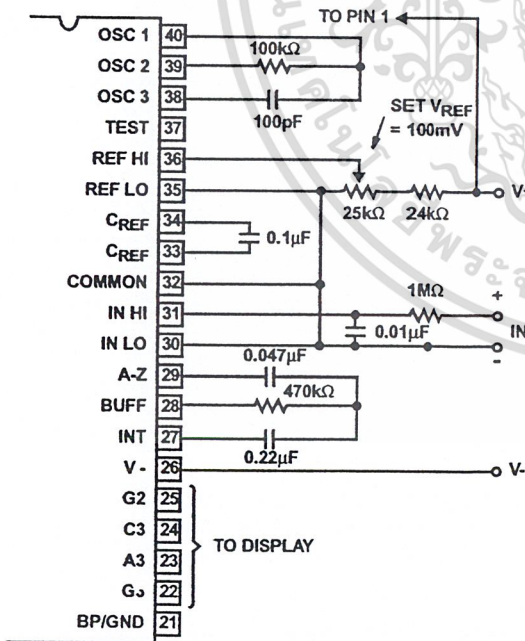
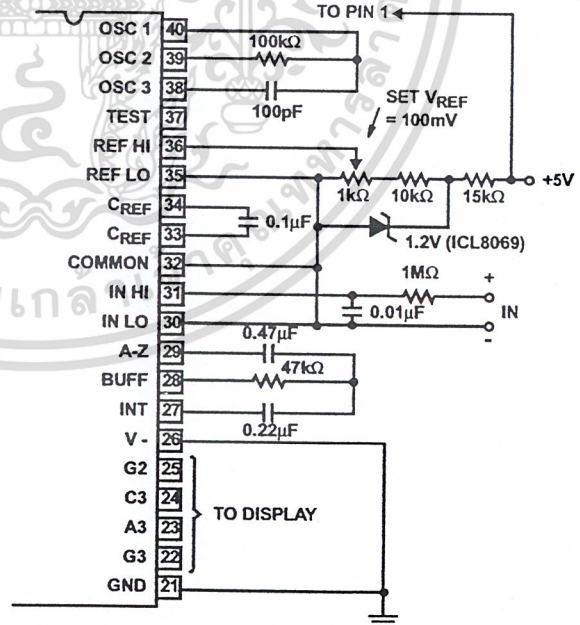


FIGURE 15. ICL7106 AND ICL7107: RECOMMENDED COMPONENT VALUES FOR 2V FULL SCALE

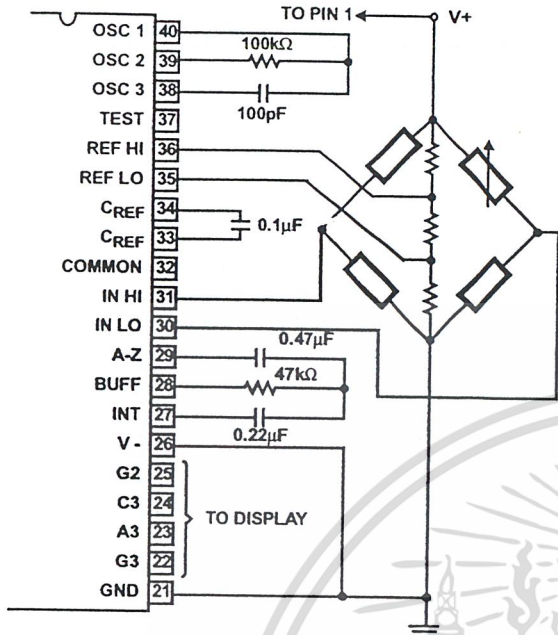


An external reference must be used in this application, since the voltage between V+ and V- is insufficient for correct operation of the internal reference.

FIGURE 16. ICL7107 OPERATED FROM SINGLE +5V

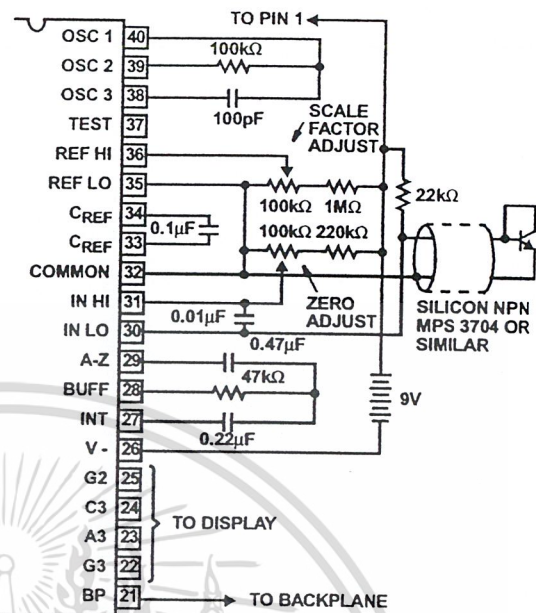
ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Typical Applications (Continued)



The resistor values within the bridge are determined by the desired sensitivity.

FIGURE 17. ICL7107 MEASURING RATIO-METRIC VALUES OF QUAD LOAD CELL



A silicon diode-connected transistor has a temperature coefficient of about $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$. Calibration is achieved by placing the sensing transistor in ice water and adjusting the zeroing potentiometer for a 000.0 reading. The sensor should then be placed in boiling water and the scale-factor potentiometer adjusted for a 100.0 reading.

FIGURE 18. ICL7106 USED AS A DIGITAL CENTIGRADE THERMOMETER

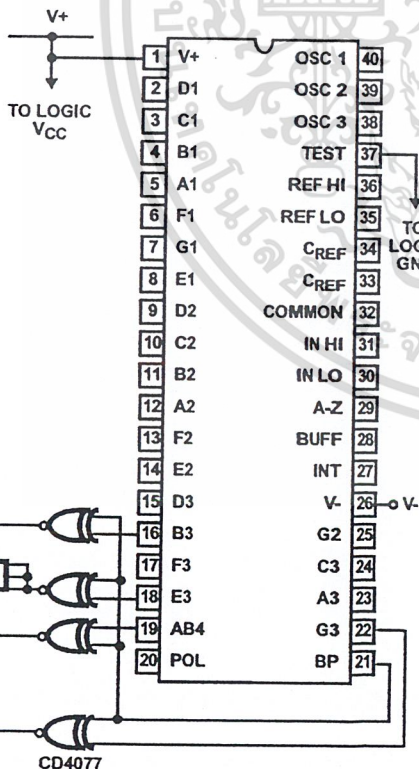


FIGURE 19. CIRCUIT FOR DEVELOPING UNDERANGE AND OVERRANGE SIGNAL FROM ICL7106 OUTPUTS

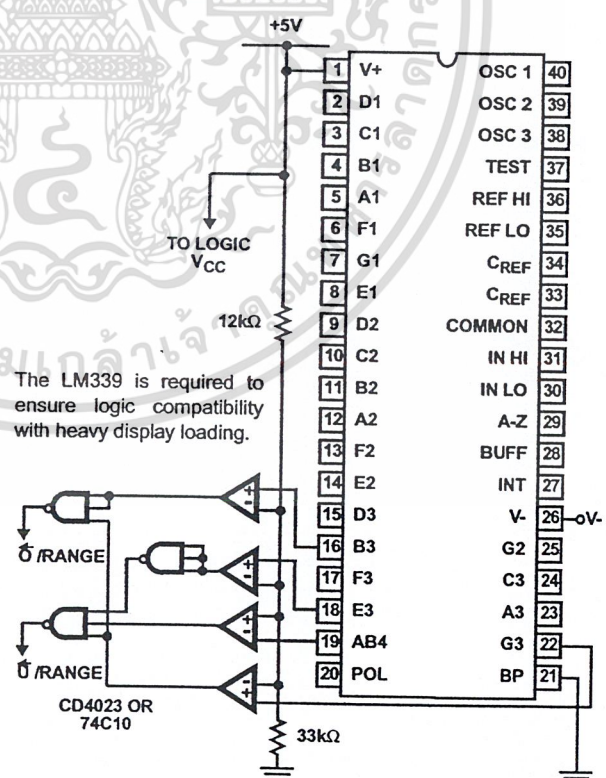
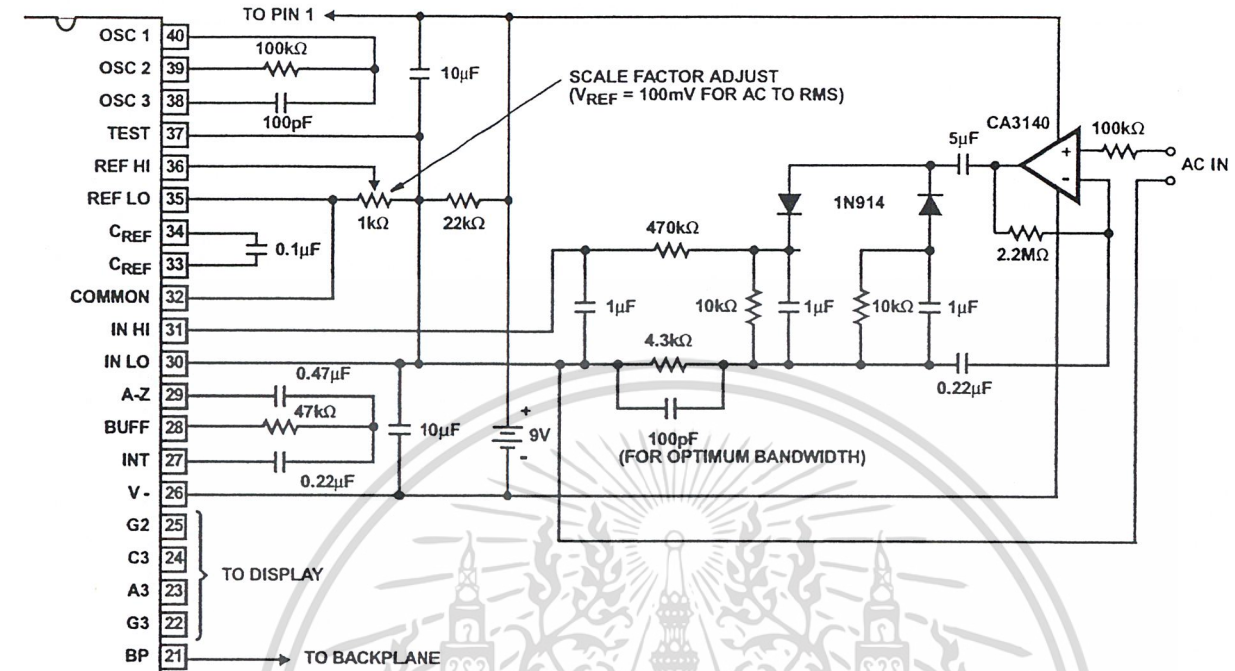


FIGURE 20. CIRCUIT FOR DEVELOPING UNDERANGE AND OVERRANGE SIGNALS FROM ICL7107 OUTPUT

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Typical Applications (Continued)



Test is used as a common-mode reference level to ensure compatibility with most op amps.

FIGURE 21. AC TO DC CONVERTER WITH ICL7106

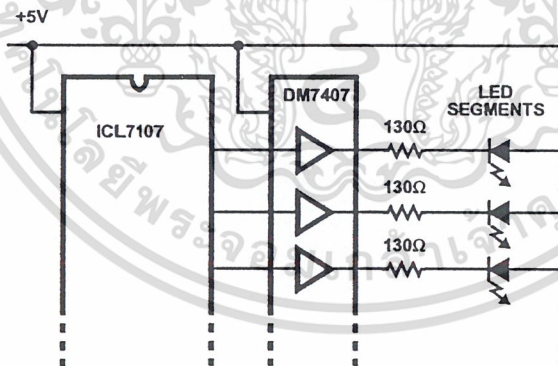
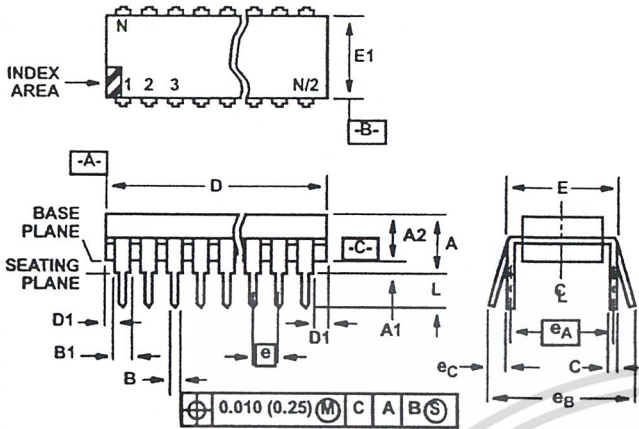


FIGURE 22. DISPLAY BUFFERING FOR INCREASED DRIVE CURRENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

Dual-In-Line Plastic Packages (PDIP)



E40.6 (JEDEC MS-011-AC ISSUE B)
40 LEAD DUAL-IN-LINE PLASTIC PACKAGE

SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.250	-	6.35	4
A1	0.015	-	0.39	-	4
A2	0.125	0.195	3.18	4.95	-
B	0.014	0.022	0.356	0.558	-
B1	0.030	0.070	0.77	1.77	8
C	0.008	0.015	0.204	0.381	-
D	1.980	2.095	50.3	53.2	5
D1	0.005	-	0.13	-	5
E	0.600	0.625	15.24	15.87	6
E1	0.485	0.580	12.32	14.73	5
e	0.100 BSC		2.54 BSC		-
eA	0.600 BSC		15.24 BSC		6
eB	-	0.700	-	17.78	7
L	0.115	0.200	2.93	5.08	4
N	40		40		9

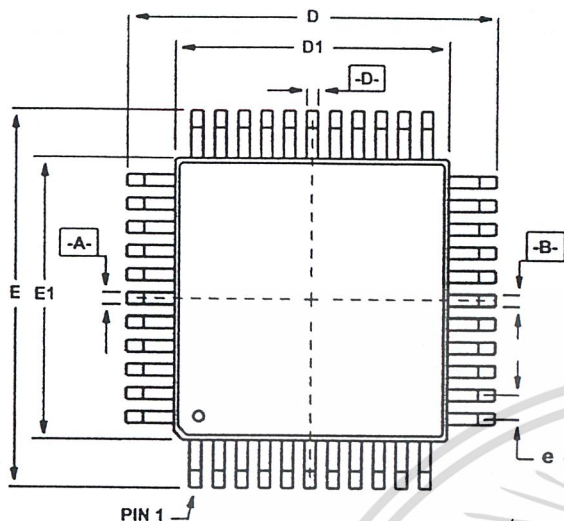
NOTES:

- Controlling Dimensions: INCH. In case of conflict between English and Metric dimensions, the inch dimensions control.
- Dimensioning and tolerancing per ANSI Y14.5M-1982.
- Symbols are defined in the "MO Series Symbol List" in Section 2.2 of Publication No. 95.
- Dimensions A, A1 and L are measured with the package seated in JEDEC seating plane gauge GS-3.
- D, D1, and E1 dimensions do not include mold flash or protrusions. Mold flash or protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- E and eA are measured with the leads constrained to be perpendicular to datum -C-.
- eB and eC are measured at the lead tips with the leads unconstrained. eC must be zero or greater.
- B1 maximum dimensions do not include dambar protrusions. Dambar protrusions shall not exceed 0.010 inch (0.25mm).
- N is the maximum number of terminal positions.
- Corner leads (1, N, N/2 and N/2 + 1) for E8.3, E16.3, E18.3, E28.3, E42.6 will have a B1 dimension of 0.030 - 0.045 inch (0.76 - 1.14mm).

Rev. 0 12/93

ICL7106, ICL7107, ICL7106S, ICL7107S

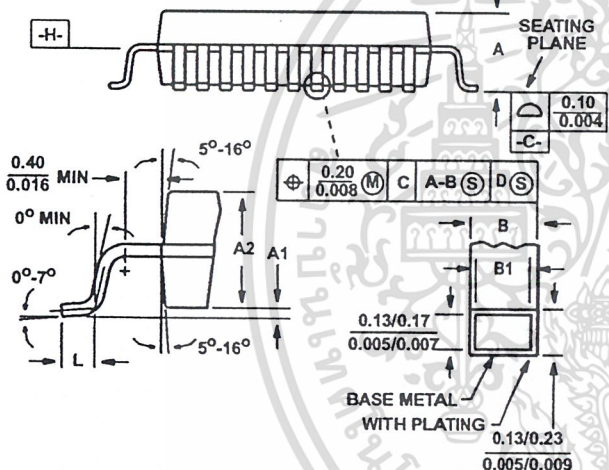
Metric Plastic Quad Flatpack Packages (MQFP/PQFP)



Q44.10x10 (JEDEC MO-108AA-2 ISSUE A)
44 LEAD METRIC PLASTIC QUAD FLATPACK PACKAGE

SYM-BOL	INCHES		MILLIMETERS		NOTES
	MIN	MAX	MIN	MAX	
A	-	0.093	-	2.35	-
A1	0.004	0.010	0.10	0.25	-
A2	0.077	0.083	1.95	2.10	-
B	0.012	0.018	0.30	0.45	6
B1	0.012	0.016	0.30	0.40	-
D	0.510	0.530	12.95	13.45	3
D1	0.390	0.398	9.90	10.10	4, 5
E	0.510	0.530	12.95	13.45	3
E1	0.390	0.398	9.90	10.10	4, 5
L	0.026	0.037	0.65	0.95	-
N	44		44		7
e	0.032 BSC		0.80 BSC		-

Rev. 1 1/94



NOTES:

1. Controlling dimension: MILLIMETER. Converted inch dimensions are not necessarily exact.
2. All dimensions and tolerances per ANSI Y14.5M-1982.
3. Dimensions D and E to be determined at seating plane **-C-**.
4. Dimensions D1 and E1 to be determined at datum plane **-H-**.
5. Dimensions D1 and E1 do not include mold protrusion. Allowable protrusion is 0.25mm (0.010 inch) per side.
6. Dimension B does not include dambar protrusion. Allowable dambar protrusion shall be 0.08mm (0.003 inch) total.
7. "N" is the number of terminal positions.

All Intersil semiconductor products are manufactured, assembled and tested under ISO9000 quality systems certification.

Intersil semiconductor products are sold by description only. Intersil Corporation reserves the right to make changes in circuit design and/or specifications at any time without notice. Accordingly, the reader is cautioned to verify that data sheets are current before placing orders. Information furnished by Intersil is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Intersil or its subsidiaries for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Intersil or its subsidiaries.

For information regarding Intersil Corporation and its products, see web site <http://www.intersil.com>

Sales Office Headquarters

NORTH AMERICA
Intersil Corporation
P. O. Box 883, Mail Stop 53-204
Melbourne, FL 32902
TEL: (407) 724-7000
FAX: (407) 724-7240

EUROPE
Intersil SA
Mercure Center
100, Rue de la Fusee
1130 Brussels, Belgium
TEL: (32) 2.724.2111
FAX: (32) 2.724.22.05

ASIA
Intersil (Taiwan) Ltd.
7F-6, No. 101 Fu Hsing North Road
Taipei, Taiwan
Republic of China
TEL: (886) 2 2716 9310
FAX: (886) 2 2715 3029

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ดุลยวัจน์ จอมแสง , “การศึกษาและการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงแบบ $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ”, ปี 2541
2. ผศ. ดำรงค์ศักดิ์ มณีพงษ์สวัสดิ์, “ฟิสิกส์ของแข็ง 2”, แสงจันทร์การพิมพ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2514
3. ชบา ชมภพพงษ์, “การศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงชนิดเซอร์รามิก”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
4. สมศักดิ์ ยงยิ่งศักดิ์ถาวร, “การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสทีฟชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
5. สัญญา คุณขาว , “การศึกษาการป้องกันสนามแม่เหล็กสำหรับหัววัดสนามแม่เหล็กความไวสูงชนิดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540
6. ชาคริต อินทรประสงค์, ธรณินทร์ บุญบำรุง, “เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความไวสูงด้วยหัววัดตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อุณหภูมิสูงชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ แบบพกพา”, ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
7. จตุพร ศรีจันทร์ , วัฒนดา อัสวพรมงคล , “การศึกษาหัววัดสนามแม่เหล็กแบบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด” , ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543